

На правах рукописи

БЕЛКИНА Наталья Александровна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И РАННЕГО
ДИАГЕНЕЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ВОДОЕМАХ ЮГО-
ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЩИТА**

Специальность 25.00.36 – геоэкология (Науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора географических наук

г. Санкт Петербург 2021

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск.

Научный консультант: **Субетто Дмитрий Александрович**, доктор географических наук, декан факультета географии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена», г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты: **Даувальтер Владимир Андреевич**, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории водных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук».

Поздняков Шамиль Рауфович, доктор географических наук, и.о. директора Института озераведения Российской академии наук Обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук».

Удачин Валерий Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится «21» апреля 2021 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.199.26 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена» по адресу: г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп.12, ауд. ____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000000675.html Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена».

Автореферат разослан «29» декабря 2020 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета к.г.н.

Паранина Алина Николаевна

Общая характеристика работы

Актуальность исследования

На современном этапе развития человеческого общества воды континентов являются ценным природным ресурсом, рациональное использование которых в условиях нарастающего дефицита пресной, качественной воды становится эффективным инструментом экономического развития Российской Федерации и повышения уровня международной безопасности в целом. Водные ресурсы Северо-Западного региона имеют стратегическое значение для европейской части Российской Федерации. В структуре экономики северных регионов преобладают природно-эксплуатирующие отрасли производства, для которых характерно масштабное вмешательство в наземные и водные экосистемы. Климатические изменения на планете дополнительно усиливают экономические и экологические риски при использовании водных ресурсов в северных широтах. Необходимость теоретического обоснования любых решений, принимаемых на государственном уровне и влияющих на экологическую безопасность страны, служит причиной детального изучения закономерностей развития водоемов в современных условиях антропогенной нагрузки и климатических изменений.

Глобальный водный вызов побуждает к развитию лимнологических исследований в Северо-Западном регионе, озерность которого одна из самых высоких в мире (20 %). На территории Республики Карелия, расположенной в восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита, сформировалась уникальная гидрографическая сеть, соединяющая более 60 тысяч озер в озерно-речные системы. Среди озер выделяются два крупнейших водоема в Европе, содержащих около 74 % от общего запаса пресных вод европейской части России: Ладожское и Онежское. Вопросы сохранения этих уникальных водоемов неоднократно обсуждались в органах законодательной власти. Охрана и защита водных ресурсов Ладожского и Онежского озер объявлена одной из приоритетных задач Водной стратегии Российской Федерации (Постановление Совета безопасности РФ, ноябрь 2014).

Заметные климатические колебания в Северо-Западном регионе в течение последних 30 лет (Груза, Ранькова, 2012) приводят к изменениям гидрологического режима, что в условиях значительной антропогенной нагрузки на водоемы Карелии (сброс сточных вод городов и мелких населенных пунктов, воздействие предприятий целлюлозно-бумажной, металлургической, горно-добывающей, лесной, пищевой промышленности, гидроэнергетики, а также влияние водного транспорта, сельского хозяйства и рыбоводства) усиливает уязвимость водных экосистем Севера. Экологические риски негативного воздействия вод на здоровье населения, связанные с ухудшением их качества при эвтрофировании, закислении и загрязнении водных объектов, требуют разработки новых

научно обоснованных принципов и подходов к мониторингу, оценке состояния и охране водоемов.

Донные отложения озер, выполняющие роль накопителя вещества и энергии в озерной экосистеме, являются уникальными природными архивами, которые хранят информацию глобального, регионального и локального уровня об эволюции озера на всем протяжении его истории (Субетто, 2009). Формирование донных отложений зависит от сочетания множества факторов естественной и антропогенной природы. Любые изменения на водосборе и в самом водоеме, вызванные причинами естественной и антропогенной природы, отражаются на количественном и качественном составе вещества, поступающего на дно, и в процессах его преобразования в донных отложениях. Теоретические представления о функционировании системы вода – донные отложения (когда изменение физических, физико-химических, химических характеристик среды меняет миграционное поведение химических элементов и ведет либо к их накоплению в составе осадка, либо к мобилизации и возврату части веществ в водную толщу) являются основанием для изучения закономерностей формирования и диагенеза донных отложений не только с целью реконструкции истории развития водоемов, но и для решения важной геоэкологической задачи разработки научных основ рационального использования, охраны и контроля водных ресурсов в условиях изменения природной среды под влиянием природных и антропогенных факторов. Это соответствует одному из приоритетных направлений развития фундаментальной науки («формирование системы своевременного распознавания больших вызовов и получение новых фундаментальных знаний, необходимых для ответа на них») в программе «Научно-технологическое развитие РФ» (Постановление Правительства Российской Федерации № 377 от 29.03.2019).

Необходимо отметить, что возможности использования химических характеристик донных отложений в качестве критерия, достоверно описывающего состояние озера и границы устойчивости его экосистемы и позволяющего прогнозировать изменения в результате внешнего воздействия, до настоящего времени остаются недостаточно исследованными. Значение донных отложений возрастает при анализе антропогенного воздействия на экосистему большого озера, поскольку результаты воздействия проявляются не сразу, часто с длительным временным интервалом, и неравномерно по всей акватории вследствие развития крупномасштабных динамических процессов.

Актуальность исследования обусловлена и естественным ходом развития лимнологии. Это и (1) необходимость более глубокого познания всех процессов, протекающих вне и внутри водоема и влияющих на формирование донных отложений и их роли в водной экосистеме; (2) необходимость выявления связей состава минеральных и органогенных

компонентов с теми или иными природно-климатическими и антропогенными изменениями и факторами с целью прогнозирования отклика озер на внешние воздействия в будущем.

Степень изученности проблемы

Теоретические представления о седиментогенезе континентальных водоемов формировались в первой половине XX века и были обобщены в трехтомном труде Страхова Н.М. (1960) по теории литогенеза. Во второй половине XX века теория континентального седиментогенеза развивалась в рамках учения о поверхностных водах суши (Hutchinson, 1957; Зайков, 1960; Россолимо, 1964, 1967, 1971, 1976; Яковлева, 1974; Borman and Watson, 1976; Blair and Cherry, 1980; Håkanson, 1983; Salomons, 1984; Драйвер, 1985; Williams et al., 1986; Жуховицкая, Генералова, 1991; Соломина, 1999; Субетто, 2002, 2009; Федотов, 2006; Холодова, 2006; Масленников, 2007; Ходжер, 2007; Московченко, 2010; Скляр, 2012; O'Connell et al., 2015 и др.). Особое внимание в этот период уделяется их ресурсному потенциалу (Корде, 1960; Лопотко, 1978) и экологическим свойствам, где донные отложения рассматриваются как аккумулятор загрязняющих веществ и источник вторичного загрязнения (Boström, 1982, 1988; Chapman, 1990; Усенков, 2007). Значительная часть работ посвящена загрязнению фосфором (что связано с проблемой эвтрофирования водоемов) и тяжелыми металлами (Williams, 1972; Håkanson, 1983; Manning, 1987; Bengtsson, 1975; Мартынова, 1984; Мизандронцев, 1990; Игнатьева, 1997; Жукова, 2001 и др.). Активно разрабатываются методы оценки загрязнения водоемов, основанные на изучении химического состава донных отложений (Golterman, 1984; Игнатьева, 2002; Белкина, 2003; Даувальтер, 2003, 2004). Изучение донных отложений водохранилищ является составной частью исследований по выявлению экологических последствий создания искусственных водоемов (Буторин и др., 1975; Прыткова, 1981, 1986, 2011; Законов, 1995; Выхристюк, 2003; Казмирук и др. 2004; Бреховских и др. 2006; и др.).

В последние годы интерес к познанию закономерностей современного осадконакопления континентальных водоемов возрастает в связи с изменениями климатической обстановки и усиливающимся антропогенным воздействием (Субетто, 2002, 2009, 2018; Белкина, 2003, 2006, 2011, 2018; Страховенко, 2007, 2016, 2019). По мнению автора, для решения этой задачи наряду с традиционными палеогеографическими методами необходимо более широкое применение геохимических методов исследования донных отложений. Начальная стадия диагенеза донных отложений является сложным биогеохимическим процессом, в котором участвуют разные бентические сообщества. В результате их жизнедеятельности происходит изменение минеральной части осадка. Современный уровень аналитической химии и физико-химических методов анализа (потенциометрия, спектро-фотометрия, атомно-абсорбционная и масс-спектрометрия,

электронная микроскопия и т. д.) позволяет быстро и качественно определить эти изменения. Поскольку ведущими процессами преобразования свежееосажденного вещества в донных отложениях являются окислительно-восстановительные реакции между органическим веществом и минеральными компонентами, логичным является решение автора применить учение А. И. Перельмана (Перельман, 1961; Касимов и др., 2002; Белкина, 2003, 2011, 2016; Folder, 2007) о геохимических барьерах для более глубокого понимания процессов осадконакопления в пресных водоемах. Эта теория лежит в основе методологии изучения процессов техногенеза и широко применяется в гидрогеологии, гидрогеохимии, биогеохимии (Шварцев, 1998; Алексеенко, 2006; Рихванов, 2007; Страховенко, 2011; Удачин, 2012, Кузьмин, 2014). Теория геохимических барьеров получила развитие в трудах А. П. Лисицына и других ученых океанологов для геохимического описания процессов седиментогенеза и диагенеза донных отложений в морях и океанах (Романкевич, 1977; Волков, 1979, 1980, 1984; Емельянов, 1979–1998; Лисицын, 1980–1983; Розанов 1984, 1987, 1995; Вершинин, 1994, 2002).

Геологические и геохимические (Перфильев, 1927, 1972; Алабышев, 1932; Шостакович, 1934, 1941; Пустовалов, 1940; Бискэ, 1959, 1971; Лукашов, 1993; Синкевич, Экман, 1995; Демидов, 2004–2006; Слуковский, 2015–2019), палеолимнологические (Лак, 1954; Давыдова, 1976–1999; Девятова, 1986, 1988; Шелехова, 1995–2018; Филимонова, 1995–2016; Лаврова, 1999–2018; Субетто и др. 2017–2019; Strakhovenko et al., 2018; Gromig et al., 2019; Hang et al., 2019; Zobkov et al., 2019) и лимнологические (Семенович, 1969–1973; Васильева, 1969–1999; Белкина 1999–2020) исследования донных отложений озер Карелии позволили собрать огромный фактический материал о лимногенезе восточной периферии Фенноскандинавского кристаллического щита в поздне- и послеледниковое время и изменении экологических характеристик водных экосистем в прошлом. Важный вклад в понимание процессов эволюции больших озер внесли исследования ученых Института геологии и водных проблем КарНЦ РАН, Института озероведения РАН, Института Арктики и Антарктики, геологической службы Финляндии (Давыдова, 1961–1968; Семенович, 1966, 1973; Абрамова и др., 1967; Знаменская и др., 1970; Лийва и др., 1971; Квасов, 1975; Экман и др., 1975; Лак, 1976; Субетто, 1986, 1993, 2000, 2002, 2018; Белкина 1998, 2005, 2007; Saarnisto, Saarinen, 2001; Васильева, 2002; Игнатьева 2002, 2013; Демидов 2005; Рыбалко, 2014, 2018 и др.). Однако вопросам изучения современного озерного осадконакопления не уделялось должного внимания, а изучение процессов на границе «вода – дно» и влияния донных отложений на водную экосистему не входило в круг задач проведенных ранее исследований.

Цель работы – установить пространственно-временные закономерности формирования и диагенеза донных отложений озер юго-восточной части Фенноскандинавского щита в современных условиях климатических колебаний и антропогенной нагрузки и разработать критерии оценки состояния континентальных водоемов по вещественному составу донных отложений.

Задачи исследования:

- выявить основные факторы, влияющие на процессы формирования донных отложений северных пресноводных водоемов (территория Карелии) в современных условиях на основе анализа литературы;
- выбрать озера как тест-объекты, расположенные в различных ландшафтных зонах с разнообразным характером осадконакопления;
- выполнить комплексные исследования выбранных водоемов, включающие (1) изучение химического состава воды, (2) физико-химического и литолого-геохимического состава донных осадков и их пространственного распределения, (3) установление источников поступления и (4) определение скоростей накопления вещества в донных отложениях;
- изучить геохимические процессы на барьерной зоне вода – донные отложения и оценить влияние донных отложений на формирование химического состава озерных вод;
- выявить и показать основные закономерности современного озерного седиментогенеза в гумидной зоне;
- исследовать влияние антропогенного воздействия на состав и свойства донных отложений. Показать возможности использования донных отложений в качестве индикатора загрязнения водоема биогенными элементами, органическим веществом, взвешенным веществом, токсическими веществами, а также в качестве индикатора трансформации экосистемы водоема в результате внешнего антропогенного воздействия;
- разработать систему критериев состояния озер Карелии по химическим показателям донных отложений с учетом геоэкологических особенностей региона и характера антропогенного воздействия;
- разработать методические рекомендации для геоэкологического мониторинга донных отложений Онежского озера.

Объект исследования – донные отложения, формирующиеся в настоящее время в 144 водоемах Карелии. Из них 126 водоемов принадлежат бассейну Балтийского моря, в том числе большие озера Европы Ладожское и Онежское. 17 малых водоемов и Выгозерское водохранилище принадлежат бассейну Белого моря (рис. 1).

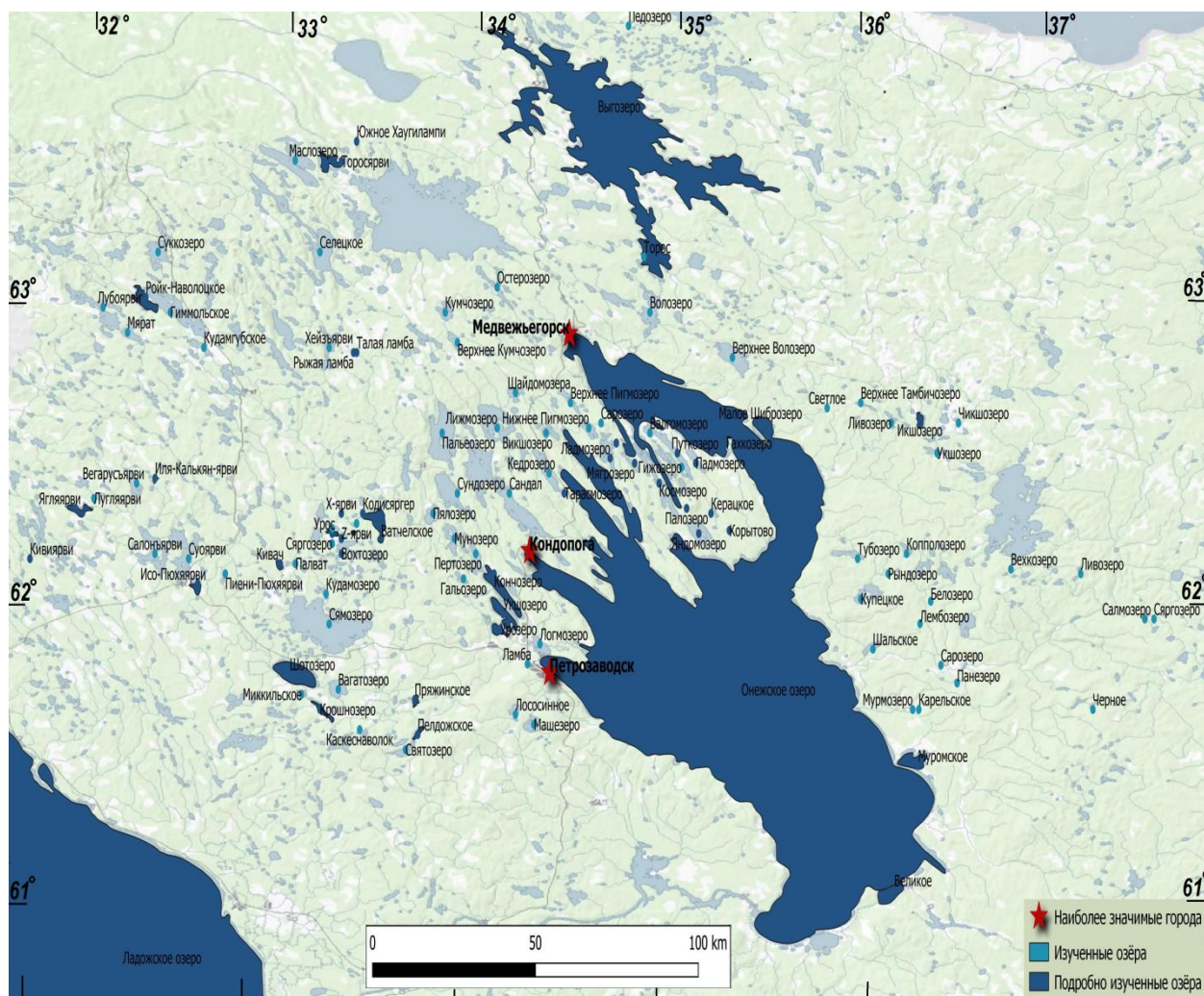


Рис. 1. Изученные озера

Предмет исследования – закономерности озерного осадконакопления и диагенеза в континентальных водоемах Севера в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия.

Основные принципы и методы исследования. В основе методологического подхода к решению поставленных задач лежат теория литогенеза о зональности осадочного процесса (Страхов, 1960) и учение о геохимических барьерах, согласно которому процессы преобразования вещества в экосистемах наиболее активно происходят на граничных участках (Перельман, 1961; Лейн, 2012, 2013). Автор исследования полагает, что процессы седиментогенеза и диагенеза лимитируют химический баланс вещества в водоеме. Они обеспечивают стабильность химического состава воды в результате изъятия из водной толщи взвешенного вещества и возврата части этого вещества после диагенетических

преобразований в донных отложениях обратно в воду в растворимых формах, что способствует устойчивому функционированию экосистемы водоема. Поверхностный слой донных отложений, являясь составной частью донного ландшафта, активно участвует в биогеоценозе водной экосистемы. Ведущим процессом в осадке, на начальной стадии диагенеза, является деградация органического вещества, которая сопровождается перераспределением химических элементов в результате сложного комплекса биогеохимических превращений. Количественные и качественные характеристики этого процесса и их изменение автор предлагает использовать в качестве геоэкологических индикаторов состояния водоема.

Выявление особенностей и закономерностей современного осадконакопления и диагенеза донных отложений проводилось на основе изучения комплекса физических, физико-химических и химических параметров, который описывает процесс преобразования вещества в барьерной зоне «вода – дно». Отбор проб воды, донных отложений и анализ вещественного состава проводились по стандартным методикам (ГОСТ 17.1.5.01-80; Аринушкина, 1982; Руководство..., 2009; Аналитические..., 2017). Поршневая трубка (модифицированный вариант трубки Алексона) и устройства для отбора донных отложений фирм «Limnos» и «Vitek» позволяют сохранить пограничную зону «вода – дно» ненарушенной. После удаления надильовой воды (сифонирование) монолит донных отложений фотографировался, описывался и делился в соответствии с литостратиграфией (Субетто, 2009). *In situ* в воде определялся газовый состав (CO_2 , O_2), pH, HCO_3^- , в донных отложениях измерялись pH, Eh, электропроводность, потребление O_2 илом (Белкина, 2003).

В лаборатории ИВПС КарНЦ РАН в воде изучались макро- (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и микрокомпоненты (Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Cd, Ni и др.), формы биогенных элементов (P, N, Si), органическое вещество (БПК₅, ХПК, ПО, цветность). Во влажных образцах донных отложений исследовались следующие характеристики: гранулометрический состав, плотность, естественная и абсолютная влажность, пористость, удельная масса, азот аммонийный (N-NH_4), Fe, Mn, фракционный состав фосфора, нефтяные углеводороды, фенолы, лигносульфонаты, растительные пигменты. Поровые воды отделялись центрифугированием. Из воздушно-сухого грунта определяли потери при прокаливании (ППП_{550°C}), зольность (Zol), азот органический ($\text{N}_{\text{орг}}$) и фосфор общий ($\text{P}_{\text{общ}}$), органический углерод ($\text{C}_{\text{орг}}$), гуминовые и фульвовые кислоты. Проводилось MW-разложение проб для спектрального анализа (ААС и ИСП МС) на микро- и макрокомпонентный состав. Закономерные изменения методов химического анализа на протяжении полувековой истории исследования донных отложений в ИВПС КарНЦ РАН потребовали проведения ряда экспериментальных работ по сравнению методик (P, N, Fe, Mn, органическое вещество) и

внедрению новых методов анализа. Результаты проведенных экспериментов учитывались в виде поправочных коэффициентов для пересчета или выбраковки данных, используемых для ретроспективного анализа состояния донных отложений. Совместно с сотрудниками СПбГУ была модифицирована методика измерения Eh (использование медиатора – ЭДТА или ОЭДФК для увеличения электрохимической активности системы $\text{Fe}^{2+,3+}$ на платиновом электроде в восстановительной и нейтральной среде гетерогенной системы) (Белкина, 2014). Метод определения БПК в воде был применен для определения потребления кислорода донными отложениями (Белкина, 2011). Адаптирована почвенная методика разделения фосфорных фракций растворами NH_4Cl для выделения лабильного фосфора, NH_4F – связанного с Al, NaOH – с Fe, H_2SO_4 – с Ca (Белкина и др., 2006).

Анализ данных осуществлялся с использованием междисциплинарного подхода с применением геосистемного, ретроспективного, географического, историко-географического, картографического, эмпирико-статистического и др. методов. Количественные показатели диагенеза (величина потоков вещества, удерживающая способность донных отложений, скорость деградации органического вещества) оценивались по изменению концентраций химических компонентов на границе «вода – дно» с применением концентрационных, или балансовых моделей (Белкина, 2003, 2011, 2015, 2018, 2019). Наряду с известными в мировой практике методами расчета потоков веществ Мизандронцева И. Б. (1990), Игнатевой Н. В. (2002) и модели Фика, соискателем были предложены и применены оригинальные способы оценки поступления веществ (ПВ) из донных отложений (Белкина, 2019). К ним относятся: (1) оценка ПВ по концентрационному распределению элементов в придонных слоях воды в период установления стратификации по температуре для малых озер, (2) оценка ПВ по изменению концентрационного распределения элементов в поверхностном слое осадка, участвующем в активном обмене веществ с водной массой в донных отложениях Онежского озера, (3) оценка средних скоростей ПВ в донные отложения на основе химического баланса озера (Белкина, 2003, 2011, 2015, 2019). Соискателем разработаны оригинальные методики: (1) расчет элементного состава органического вещества донных отложений, основанный на решении системы уравнений окисления органического вещества в различных условиях, и (2) методика оценки скорости деградации органического вещества по концентрационному распределению $\text{C}_{\text{орг}}$ с применением секционной модели для поверхностного слоя донных отложений в условиях глубоководных аккумуляционных зон Онежского озера (Белкина, 2018, 2019).

Скорость осадконакопления рассчитывалась на основе (1) использования радиометрических методов датирования (определение изотопов ^{210}Pb и ^{137}Cs для поверхностных донных отложений и ^{14}C для длинных кернов), которые выполнялись в

университетах гг. Санкт-Петербурга, Новосибирска, Лозанны (Швейцария) и Джорджии (США), и (2) экспериментальных расчетов с использованием данных годового накопления вещества в седиментационных ловушках. При отсутствии аналитических данных скорость осадконакопления рассчитывалась по формуле Стокса (Håkanson, 1983). Была разработана методика оценки средней скорости осадконакопления на основе химического баланса озера с учетом кинетических параметров трансформации органического вещества, Si, Fe и Al в озерной экосистеме (Белкина, 2020).

Минералогические исследования донных отложений выполнялись на базе ИГМ СО РАН с применением электронной микроскопии (Овдина и др., 2018; Страховенко и др., 2019).

Информационной основой исследования послужили результаты исследований автора (1998–2020 гг.), справочник «Озера Карелии» (2013), каталог «Донные отложения озер Карелии» (1992), атлас «Онежское озеро» (2009), географические карты, труды научных конференций, монографии, периодические издания, фондовые материалы ИВПС КарНЦ РАН (1960–1997 гг.), электронные базы данных: БД № 2017620010 «Палеогеография Онежского озера и его водосбора» (авторы Субетто Д. А., Потахин М. С., Гурбич В. А., Шелехова Т. С.) и БД № 2011620137 «Озера Карелии» (авторы Филатов Н. Н., Кухарев В. И., Потахин М. С.).

Соответствие научной специальности. В соответствии с формулой специальности 25.00.36 «Геоэкология», объединяющей исследования состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов, диссертационная работа представляет собой фундаментальное исследование закономерностей современного седиментогенеза континентальных водоемов, функционирующих в условиях гумидного климата под влиянием природных и антропогенных факторов на территории юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Сформулированные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 25.00.36 «Геоэкология» пункта 1.8 паспорта специальности: «природная среда и геоиндикаторы ее изменения под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека: химическое и радиоактивное загрязнение почв, пород, поверхностных и подземных вод и сокращение их ресурсов, наведенные физические поля, изменение криолитозоны». Научные результаты диссертационного исследования, отраженные в поставленных задачах, имеют научную новизну: (а) выявлены пространственные и временные закономерности современного седиментогенеза водоемов, расположенных в юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита (неравномерность распределения осадочного вещества определяется

зональными (ландшафтно-климатические условия) и а зональными (геологические условия водосборных территорий, морфология озерных котловин, антропогенная нагрузка) факторами; преимущественное формирование донных отложений железо-кремне-гумусовых, железо-гумусо-кремниевых или гумусо-железо-кремневых; связь типа озерного накопления с размерами и морфологией котловины и с площадью водосбора; значимая роль биогеохимических процессов в образовании аутигенных минералов железа и марганца в донных отложениях во внутриводоемном цикле фосфора в водной экосистеме; (б) выявлены изменения в процессах раннего диагенеза под воздействием антропогенных факторов (физические, физико-химические и химические характеристики придонных вод и донных отложений: pH и Eh, газовый состав, естественная влажность, пористость, удельная масса, количественные и качественные показатели органического вещества, биогенные элементы и внутренняя нагрузка, распределение Fe и Mn и редокс-чувствительных форм других элементов); (в) впервые разработана система критериев оценки состояния озер юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита по химическим показателям донных отложений.

Практическое значение результатов диссертационного исследования соответствует задаче специальности 25.00.36 «Геоэкология»: поиск новых научно обоснованных принципов и подходов к мониторингу, оценке состояния и охране водоемов с целью рационального использования и контроля их природных ресурсов и сохранения озер для нынешних и будущих поколений людей. Научные результаты (а) многолетних наблюдений на Онежском озере, на основе которых была сформирована уникальная программа мониторинга донных отложений, и (б) ретроспективная оценка изменения химического состава донных отложений Выгозерского водохранилища, позволившая оценить последствия создания водоема, негативно влияющие на качество воды в настоящее время, и (в) разработанная соискателем комплексная методика оценки вторичного загрязнения водоема с использованием гидравлического, диффузионного и балансового методов оценки потоков вещества во взвешенной и растворенной форме из донных отложений, в зависимости от гидрологического режима, динамики вод и морфометрических особенностей водоема, которая была апробирована на Онежском озере и при реализации ФЦП «Внутренняя нагрузка в Псковско-Чудском озере» и в поисковом научном исследовании «Оценка неконтролируемого диффузного поступления веществ из донных отложений Иваньковского водохранилища» в рамках приоритетного проекта «Оздоровление Волги», соответствуют пунктам 1.12. («Геоэкологический мониторинг и обеспечение экологической безопасности, средства контроля») и 1.10. («Разработка научных основ рационального использования и охраны водных, воздушных, земельных, рекреационных, минеральных и энергетических

ресурсов Земли, санация и рекультивация земель, ресурсосбережение») области исследования паспорта специальности 25.00.36 «Геоэкология».

Научная новизна

- Впервые на современном научно-методическом уровне исследована пространственно-временная изменчивость характеристик вещественного состава воды и донных отложений на границе «вода – дно» в континентальных водоемах Севера (на примере озер Карелии), функционирующих в настоящее время в идентичных климатических условиях. На основе полученных данных выполнена детализация процесса литогенеза гумидного типа в озерах региона.
- Впервые изучены особенности процесса накопления, трансформации и удержания фосфора в донных отложениях Онежского озера, обеспечивающего устойчивость экосистемы к внешним воздействиям естественной и антропогенной природы, которые заключаются в том, что на ранней стадии диагенеза в окислительной обстановке биогеохимическое разложение органо-минеральных взвесей железо-гумусовой природы приводит к образованию аутигенных минералов железа и марганца.
- Впервые выполнена оценка (1) удерживающей способности донных осадков по отношению к биогенным элементам, (2) внутренней нагрузки и ее пространственно-временных изменений под воздействием климатических и антропогенных факторов.
- Впервые разработана и предложена система критериев оценки состояния озера по химическим показателям донных отложений с учетом геоэкологических особенностей региона и характера антропогенного воздействия.

Практическое и теоретическое значение результатов исследования.

- Получено новое знание о функционировании водных экосистем континентальных водоемов Севера в современных условиях гумидного климата. Созданы БД № 2015620251 «Химический состав донных отложений Онежского озера», № 2018620170 «Донные отложения Выгозерского водохранилища», № 2019622088 «Донные отложения разнотипных озер краевой зоны валдайского оледенения».
- Разработаны и применены на практике методические рекомендации для оценки состояния водоема и степени его загрязнения по донным отложениям для программы мониторинга Онежского озера, учитывающие морфологию озерной котловины, распределение речного стока и антропогенной нагрузки, тип загрязнения и интенсивность воздействия (Белкина, 1998, 2007).
- Результаты исследований применялись для экологической оценки влияния деятельности человека на водоемы в рамках хозяйственных договоров по программе мониторинга водных объектов РК (1998–2003). Автор руководил НИР по оценке

последствий нефтяного загрязнения Петрозаводской губы (2001–2002) и по оценке влияния форелевых хозяйств (2013–2015) на качество воды заливов Ладожского озера. Участвовал в работах по оценке техногенного загрязнения Кондопожской губы Онежского озера отходами ЦБ (1999, 2003).

- Методические наработки были опробованы при выполнении проектов: ФЦП «Внутренняя нагрузка в Псковско-Чудском озере» (2017); ПНИ «Оценка неконтролируемого диффузного поступления веществ из донных отложений Иваньковского водохранилища» в рамках приоритетного проекта «Оздоровление Волги» (2018).
- Основные результаты исследования использовались автором в педагогических целях для подготовки учебных программ и чтения углубленных курсов «Экологическая химия», «Окислительно-восстановительные процессы в окружающей среде», «Биогенные элементы» в Петрозаводском государственном университете (специалитет, магистратура), «Геоэкология» – в ИВПС КарНЦ РАН (аспирантура).

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Основные положения и выводы подтверждаются многолетними исследованиями на природных объектах в рамках: 17 научно-исследовательских тем госзадания ИВПС КарНЦ РАН (в настоящее время – руководитель темы 0218-2019-0050 «Пространственно-временная трансформация озерного седиментогенеза гумидной зоны. Поздне- и послеледниковое время»); 8 проектов РФФИ, из них в качестве руководителя двух грантов (18-45-100002-р_север (2018–2020) «Роль донных отложений в процессе формирования химического состава поверхностных вод гумидной зоны на примере озер Карелии» и 05-05-97508-р_север «Исследование изменения закономерностей распределения и трансформации нефтяных углеводородов в озерных донных отложениях» (2005–2006), в качестве исполнителя – 6 (02-05-97508 (2003–2004) «Моделирование Онежского озера для решения задач использования и сохранения его водных ресурсов»; 06-05-64708 (2007–2008) «Процессы деградации нефти в условиях окружающей среды и дальнейшего преобразования продуктов деструкции в природных водах (компьютерное моделирование)»; 08-05-98811-р_север (2009–2010) «Нормирование антропогенного воздействия на водные объекты Севера с учетом их ассимиляционной способности»; 11-05-01140 (2011–2013) «Изучение геохимических аномалий на границе вода – дно, связанных с субаквальной разгрузкой подземных вод в озера восточного склона Балтийского щита»; 18-05-00303 (2018–2020) «Строение верхней части четвертичного разреза и палеогеография донных ландшафтов озерных бассейнов по восточной периферии Балтийского кристаллического щита в позднечетвертичное время»; 19-05-50014 (2019–2021) «Исследование природных и антропогенных воздействий на

биогеохимические процессы концентрирования и рассеивания элементов в Онежском озере»); 6 международных проектов (1998–2000 TACIS TSP40/97 DIMPLA (Russia – Finland), 1997–1998 «Eutrophication of large lakes (Lake Ladoga and Saimaa)» (Russia – Finland), 2003–2004 TACIS TSPF/0302/0033 MAQREL (Russia – Finland), 2013–2015 «PLOT – Paleolimnological Transect» (Russia – Germany), 2015–2017 «Life Under Ice» (FEEL foundation, Russia-Switzerland), 2017 «Internal load of the Pskov-Chudskoe Lake» (Russia – Estonia); 3 проектов РНФ: 14-17-00766 (2014–2016) «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние», 18-17-00176 (2018–2020) «Палеолимнология Онежского озера: строение, процессы накопления и трансформации донных отложений. От приледникового озера до современных условий» и 19-17-00035 (2019–2021) «Распространение микрочастиц антропогенных полимеров (микропластика) и ассоциированных с ними тяжелых металлов и их соединений в крупных водных объектах суши (на примере Онежского озера)».

Методы исследования соответствуют современному уровню науки. Степень достоверности подтверждается достаточным объемом фактического материала натурных и лабораторных исследований, логикой и последовательностью проведения исследований.

Личный вклад автора. В основу работы положены собственные исследования автора на озерах Карелии, выполняемых на протяжении более 20 лет (1998–2019 гг.). Постановка проблемы, методическое обеспечение ее решения и анализ результатов осуществлены автором. Консультационную помощь при обработке материала оказали д.г.н. Д. А. Субетто, д.г.-м.н. В. Д. Страховенко, д.г.-м.н. А. Е. Рыбалко, к.г.-м.н. Г. С. Бородулина, к.г.н. Н. В. Игнатьева, Е. П. Васильева и д.х.н. П. А. Лозовик. Экспедиционные и аналитические работы проводились с участием сотрудников лабораторий гидрохимии и гидрогеологии и палеолимнологии ИВПС КарНЦ РАН.

Публикации. Основные положения опубликованы в 115 научных трудах (в том числе 26 работ опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 16 из них по специальности) 18 статей входят в базы цитирования WoS и Scopus (в том числе из списка Q1 – 5 работ) и в 9 коллективных монографиях (общий объем – 216 п.л., из них авторских 14). По результатам исследований получены 3 авторских свидетельства (в соавторстве) на созданные БД. Основные научные положения работы и защищаемые в диссертации тезисы обсуждались на 26 международных и 34 российских и региональных конференциях.

Объем и структура. Диссертация состоит из введения (стр. 5–16), 8 глав (История изучения донных отложений озер на территории республики Карелии (стр. 17–20). Объекты, методы и основные принципы исследования (стр. 21–39). История развития озерно-речной сети и современные физико-географические условия формирования донных отложений

восточной части Фенноскандинавского (Балтийского) щита (стр. 40–74). Антропогенное воздействие на исследуемые водоемы (стр. 68–74). Современные донные отложения озер восточной части Фенноскандинавского щита (стр. 75–107). Донные отложения Онежского озера (стр. 108–186). Донные отложения Выгозерского водохранилища как индикатор антропогенной трансформации водоема (стр. 187–206). Критерии оценки состояния водоема гумидной зоны по донным отложениям (стр. 207–246).), выводов (стр. 247–249), заключения (стр. 250–252), списка сокращений и условных обозначений (стр. 253–254, списка литературы (стр. 255–279), включающего 431 наименование (из них 89 на английском языке), списка иллюстративного материала (стр. 280–286) и приложения (стр. 287–294). Общий объем – 294 стр., включая 89 рисунков и 62 таблицы.

Основные защищаемые положения

1. В современных ландшафтах восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита, унаследовано сформированных на территории бывшего бассейна Онежского приледникового озера в условиях гумидного климата, в настоящее время преобладают озера со смешанным типом седиментогенеза (железо-кремне-гумусовый, железо-гумусо-кремниевый, или гумусо-железо-кремниевый). Неравномерное распределение и разнообразие осадочного вещества определяются зональными (ландшафтно-климатические условия) и азональными (геологические условия водосборных территорий, морфология озерных котловин, антропогенная нагрузка) факторами.

В диссертации выполнена типологизация факторов, лимитирующих современные процессы озерного седиментогенеза в условиях гумидного климата (климатический, геоморфологический, геологический, физико-географический, ландшафтный, антропогенный) на территории бывшего бассейна Онежского приледникового озера.

Умеренный влажный климат определяет гумидный тип литогенеза (Страхов, 1960), где преобладающее существование воды в жидком фазовом состоянии создает условия для многовариантности протекания процессов физической, химической и биологической дифференциации вещества на всех стадиях озерного седиментогенеза. Поэтому предсказать последствия внешнего воздействия на водоемы северной гумидной зоны (в том числе антропогенного характера) в силу многообразия возможных путей развития водных систем – очень сложно. Кроме этого, озера региона являются с геологической точки зрения молодыми, их возраст не превышает 15 тыс. лет (Субетто, 2009). Во временном интервале 15–11 тыс. л.н. происходила дегляциация изучаемой территории, и формировались разнообразные и разновозрастные озера, в том числе и крупное Онежское приледниковое

озеро (ОПО). Отступление ледника в направлении с юго-востока на северо-запад определило пространственно-временную дифференциацию озер и, как следствие, продолжительность и особенности трансформации условий седиментогенеза от ледниково-озерных к озерным. Эти процессы проходили в результате кардинальных изменений климата на рубеже позднего плейстоцена и голоцена от холодных, арктических (нивальный тип литогенеза) к теплым и влажным (гумидный тип литогенеза). Временная последовательность изоляции малых озер от ОПО (поздний неоплейстоцен – голоцен, 15–11 тыс. л. н.) является главным эволюционным фактором, который в совокупности с размерами озер, особенностями их геолого-геоморфологического местоположения, спецификой почвенно-растительного покрова и климата не только определил общие и индивидуальные пути развития озер, но и повлиял на закономерности их функционирования в настоящее время.

Разнообразие современных седиментационных обстановок в озерах прежде всего определяется геолого-геоморфологическим строением водосборных бассейнов (контролирующим гидрологический режим озера) и озерных котловин (определяющим термические, динамические и биологические особенности конкретного водоема). Озера с момента своего возникновения развивались как пресноводные водоемы, обладающие индивидуальными особенностями накопления осадочного вещества, в зависимости от их расположения на (1) ледораздельных возвышенностях, или на (2) озерных равнинах, или на (3) территориях развития денудационно-тектонического рельефа. В отдельную (4) группу можно отнести Онежское озеро.

Основными геологическими факторами, определяющими развитие озер, являются (1) расположение региона исследования на границе двух крупных геологических структур – Фенноскандинавского кристаллического щита и Русской платформы, сложенных магматическими и метаморфическими породами архейского и протерозойского возраста и осадочными палеозойскими породами, и перекрывающим их чехлом рыхлых четвертичных отложений, (2) преобладание кристаллических силикатных пород, обогащенных минералами с высоким содержанием железа и марганца. Господство силикатных горных пород создало благоприятные условия для накопления в донных отложениях кремния, поступающего в водоемы в составе взвешенного и растворенного вещества, что, в свою очередь, стимулирует развитие диатомового комплекса фитопланктона с последующим накоплением не только обломочного, но и биогенного кремния в донных отложениях. Относительно малое содержание фосфора в горных породах и почвах влечет за собой его низкие концентрации в поверхностных водах и, как следствие, лимитирование озерных экосистем по фосфору. Высокое содержание в породах железа и марганца в сочетании с подзолообразовательными почвенными процессами является причиной их активной миграции в составе

органоминеральных комплексов в водах региона и накопления в виде железо-марганцевых конкреций, корок или в виде обогащенных приповерхностных слоев в донных отложениях. Необходимо отметить малую минерализацию поверхностных вод (15–40 мг/л) (Лозовик и др., 2017), которая является одной из причин уязвимости водных экосистем изучаемого региона к внешнему воздействию, поскольку они не обладают достаточной буферной емкостью (ни химической, ни биологической) для компенсации этого воздействия.

Процессы современного седиментогенеза в озерах Карелии развиваются на территории, обладающей определенным природным единством, обусловленным общим происхождением и историей развития. Они отражают пространственно-временные изменения этой территории в результате обмена веществом и энергией между компонентами природной среды. Соискатель рассматривает Онежское озеро и его современный бассейн как единый природно-территориальный комплекс (ПТК) регионального уровня, где Онежское озеро является конечным водоемом стока вещества с водосбора, а малые озера его бассейна, связанные в единую гидрографическую сеть, выполняют в процессе переноса осадочного вещества функцию избирательных ловушек. В результате чего происходит замедление в пределах ПТК миграции литофильных элементов, элементов живого вещества и элементов, участвующих в жизнедеятельности водных организмов. Процесс накопления вещества на дне водоема рассматривается в диссертации как процесс изъятия вещества из экосистемы озера, обеспечивающий ритмичность и устойчивость озера как элемента ПТК к внешнему воздействию.

Изучение химического состава донных осадков водоемов исследуемой территории показало, что три элемента (кремний, углерод и железо) составляют основную их массу (Белкина, 1998, 2003, 2007, 2016, 2018). Кремний поступает в донные отложения, главным образом, в составе обломочных минералов (кварц и полевые шпаты) и биогенного Si. Углерод поступает в составе детрита и гумуса, а железо – в виде нерастворимых соединений органической и неорганической природы, образующихся в процессе внутриозерной трансформации. В настоящее время в условиях умеренного влажного климата на исследуемой территории доминируют озера со смешанным типом озерного накопления: **железо-кремне-гумусовый, железо-гумусо-кремниевый** или **гумусо-железо-кремниевый**. Мобилизация, транспортировка и осаждение элементов, имеющих химическое сродство к силикатным минералам, гумусу и железу (Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Sr, Ni, Mo, Co, S, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb), контролируются особенностями седиментогенеза основных элементов (Белкина, 2018, 2019). Редкие (рассеянные) элементы поступают в донные отложения с обломочным материалом.

Для большинства озер региона характерно неравномерное распределение осадочного материала на дне водоема, которое закономерно контролируется морфологией котловины, глубиной и динамикой вод: песчано-гравийные донные отложения слагают литоральную зону, а глинистые илы господствуют в глубоководных зонах. Разный генезис взвешенного вещества, отличия гидрологических, морфометрических и биологических характеристик озер определяют различия в химическом составе отложений и разброс значений для каждого типа осадка (табл. 1).

Таблица 1. Обобщенный химический состав поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений, по данным для 139 малых озер Карелии, %

Тип осадка*	Число проб	Значение	Органическое вещество						Минеральная часть		
			C _{орг}	C _{гк}	C _{фк}	P _{общ}	N _{NH4+}	N _{орг}	Zol	Fe	Mn
Песок	147	мин.	0,03	0,01	0,03	0,01	0,001	0,06	94,86	0,00	0,00
		макс.	2,40	1,35	0,64	0,04	0,004	0,77	99,80	6,73	0,08
		сред.	0,98	0,36	0,29	0,03	0,002	0,22	97,52	0,50	0,02
Алеврит	510	мин.	1,30	0,04	0,00	0,03	0,003	0,01	9,02	0,17	0,00
		макс.	42,50	11,60	9,10	5,00	0,170	3,99	94,32	42,20	1,02
		сред.	15,43	1,79	1,52	0,17	0,027	1,17	78,67	4,18	0,23
Глина	75	мин.	0,71	0,14	0,07	0,06	0,000	0,08	75,52	0,03	0,04
		макс.	5,58	0,66	0,79	0,12	0,030	0,97	97,74	1,68	0,45
		сред.	2,64	0,45	0,44	0,09	0,009	0,34	92,34	1,15	0,17

*По преобладающей гранулометрической фракции (песок 0,05–2 мм; алеврит 0,005–0,05 мм, глина <0,005 мм).

Анализ связей между вещественным составом донных отложений, химическим составом вод, морфологией котловин и географическими характеристиками водосборной территории водоемов бассейна ОПО показал, что химический состав осадков и седиментационная обстановка в озерах во многом зависят от локальных ландшафтных условий (рис. 2). Общими параметрами для всех озер являются следующие: (1) геолого-геоморфологические условия и площадь водосборной территории, влияющие на поступление вещества в озеро и определяющие накопление минеральной составляющей донных отложений; (2) седиментация осадочного вещества происходит преимущественно в условиях гидрокарбонатно-кальциевых вод; (3) морфогенетические характеристики озерных котловин определяют накопление в донных отложениях органического вещества; (4) поступление железа в донные отложения определяет направленность процессов раннего диагенеза в самом осадке.

Донные отложения аккумуляционных зон 72 озер из 139 исследованных условно характеризуются как органоминеральные осадки (содержание органического вещества > 30 %). В целом содержание органического вещества в донных отложениях аккумуляционных

зон увеличивается с ростом трофического уровня водоема от олиготрофного к эвтрофному (Белкина, 2011).

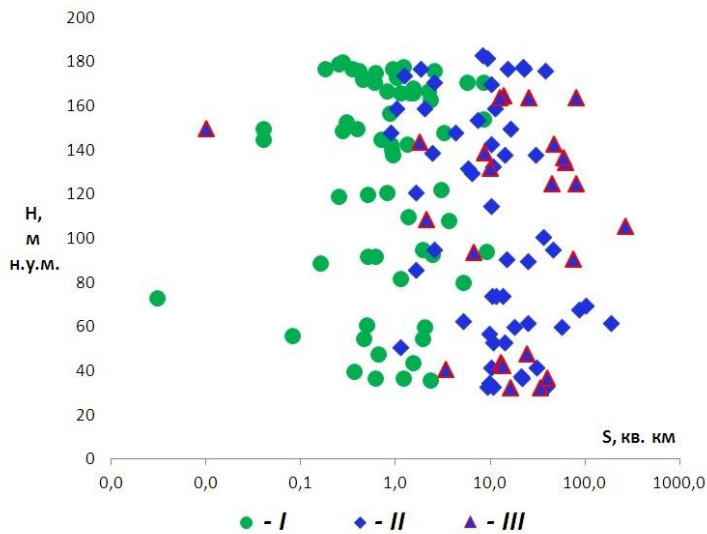


Рис. 2. Распределение озер бассейна ОПО с разным типом накопления: (зеленый цвет – органоминеральный (зольность < 80 %), синий цвет – минеральный (зольность > 80 %); I – железо-кремне-гумусовый, II – железо-гумусо-кремниевый, III – гумусо-железо-кремниевый) в зависимости от местоположения (H – высота над уровнем моря, м) и размеров (S – площадь зеркала, км²)

Для большинства озер «органонакопителей», которые встречаются во всех ландшафтах бассейна ОПО, характерен *железо-кремне-гумусовый* тип накопления. Например, современные донные отложения эвтрофного мезогумусного оз. Южное Хаугилампи (развивалось как самостоятельный водоем с момента его образования около 12 тыс. л. н. на Западно-Карельской возвышенности) относятся к органическому типу со следующими средними значениями: ППП₅₅₀ = 60 %, C_{орг} = 26 %, Zol = 38 %, ПК изменяется от 3 до 5 мгО₂/г, концентрация растительных пигментов ΣChl_{a,b,c} = 1000 мкг/г, феофитина = 1200 мкг/г. Высокие валовые содержания биогенных элементов (N_{орг} = 1,9 %, N_{NH4} = 0,02 %, P_{общ} = 0,3 % (от 0,1 до 1 %) и P_{мин} = 0,2 % (от 0,01 до 1 %)), а также немонотонное распределение биогенных элементов и Mn, Fe (средние концентрации марганца – 0,04 % и железа – 2,5 % близки к кларковым значениям) по вертикали колонки указывают на активные диагенетические процессы в донных отложениях (Белкина, 2018).

Интенсивный процесс накопления органического вещества разного генезиса в донных отложениях, независимо от особенностей ландшафта, трофического статуса водоема и химического состава вод, в настоящее время происходит в малых (площадь зеркала S_з < 1 км²) неглубоких озерах (ламбы – местное название) с малой площадью водосбора (S_в < 1 км²) составляют 97 % от общего числа озер. Например, в эвтрофных ламбе Кобытово (ППП₅₅₀ = 86 %, Zol = 11 %, S_в = 0,1 км², S_з = 0,003 км²) и оз. Полевском (ППП₅₅₀ = 66 %, Zol = 33 %, S_в = 31,8 км², S_з = 0,45 км²), расположенных на Заонежском полуострове в пределах озерно-ледниковой равнины и являющихся реликтами ОПО, отчленившимися 12–11 тыс. л. н.. И в ацидотрофной Голубой ламбе, образовавшейся 7–9 тыс. л. н. в результате таяния массивов

мертвого льда на Вохтозерской возвышенности ($S_b = 0,21 \text{ км}^2$, $S_3 = 0,04 \text{ км}^2$, $\text{ППП}_{550} = 89 \%$, $Z_{ol} = 9 \%$). Скорости осадконакопления в этих ламбах различаются более чем на порядок (10, 1 и 0,1 мм/год, соответственно). Генезис органического вещества также разный: для оз. Полевского основным источником является аллохтонный гумус, для оз. Кориново – водная растительность. Для Голубой ламбы, имеющей низкую продуктивность, источником органического вещества является наземная и водная растительность. Низкая минерализация воды и дефицит фосфора лимитируют здесь естественное развитие бентосных сообществ, способных переработать органическую массу растительного опада (атомные отношения C:N = 25; C:P = 1143). Необходимо отметить, что в отличие от более крупных озер региона формирование донных отложений в ламбах происходит в разной геохимической среде (карбонатный класс вод группы калия, с $\Sigma_{и} = 30 \text{ мг/л}$ в оз. Кориново, мезогумусный гидрокарбонатный класс группы кальция и магния с $\Sigma_{и} = 60 \text{ мг/л}$ в оз. Полевское и олигогумусный сульфатный класс группы кальция с $\Sigma_{и} = 3 \text{ мг/л}$ в Голубой ламбе).

Донные отложения 62 исследованных озер относятся к минеральным осадкам. Наиболее распространенный тип озерного накопления в этой группе – **железо-гумусо-кремниевый**, представителем которого является мезотрофное оз. Вендюрское. Водоем аккумулятивно-остаточного генезиса расположен на Вохтозерской возвышенности, имеет 2 притока, $S_b = 79,8 \text{ км}^2$, $S_3 = 10,1 \text{ км}^2$. Донные отложения представлены серо-коричневым илом ($\text{ППП}_{550} = 29 \%$, $Z_{ol} = 68 \%$, $\text{Fe} = 7,8 \%$). Профили Eh, Fe, Mn, P по вертикали колонки изменяются синхронно.

Гумусо-кремниевый тип накопления встречается на территории бассейна ОПО крайне редко. Диатомовые осадки накапливаются, например, в мезотрофном оз. Сяргозеро, расположенном в северной части Заонежского полуострова ($S_b = 17,4 \text{ км}^2$, $S_3 = 0,65 \text{ км}^2$). Их отличительной особенностью являются относительно высокие значения пористости (0,94), низкие значения показателя удельной массы ($\gamma = 1,1 \text{ г/см}^3$), малое содержание железа (0,5%). Соотношение органического вещества ($C_{орг} = 21 \%$, $\text{ППП}_{550} = 45 \%$) и минеральной части осадка ($Z_{ol} = 51 \%$) близко к 1:1. Содержание биогенных элементов $N_{орг} = 1,3 \%$ и $P = 0,05 \%$ (C:N = 18; C:P = 1029). Распределение pH, Eh и элементов химического состава по вертикали осадка в поверхностном слое имеет монотонный характер.

Гумусо-железо-кремниевые осадки формируются в окислительной обстановке в водоемах с развитой литоральной зоной и большой площадью водосбора, имеющего высокий процент заболоченности, на котором распространены иллювиально-гумусово-железистые подзолы. Отложения данного типа формируются и в олиготрофных озерах с низкой цветностью воды с глубоко врезаемыми котловинами (оз. Ладмозеро, $S_b = 120 \text{ км}^2$, $S_3 = 24 \text{ км}^2$, $h_{max} = 52 \text{ м}$, класс воды гидрокарбонатный) и в мелких высокопроточных водоемах с

высокой цветностью воды (оз. Шотозеро, $S_b = 5540 \text{ км}^2$, $S_3 = 74 \text{ км}^2$, $h_{\max} = 10 \text{ м}$, класс воды карбоксилатный). Особенностью седиментогенеза таких водоемов является накопление в литорали на глубине от 1 до 5 м озерных железных руд в виде корок, конкреций, оолитов (Перфильев, 1972; Белкина, 2005). Эти биогеохемогенные осадки, содержащие до 40 % Fe и 2 % Mn, состоят из рентгеноаморфного вещества, гетита, кварца, плагиоклаза, реже глинистых минералов и карбоната (Овдина и др., 2018; Strakhovenko et al., 2020). В то же время содержание железа в иловых отложениях, залегающих в глубоководных зонах, обычно ниже кларка (например, в оз. Шотозеро $C_{\text{орг}} = 11 \text{ \%}$, $\text{ППП}_{550} = 19 \text{ \%}$, $N_{\text{общ}} = 1 \text{ \%}$, $P_{\text{общ}} = 0,1 \text{ \%}$, $\text{Fe} = 2 \text{ \%}$, $\text{Mn} = 0,1 \text{ \%}$). Накопление железа в илах (до 40 %) свойственно также маленьким неглубоким лесным ламбушкам, имеющим заболоченный водосбор. В Карелии до XIX века озерные руды использовались человеком для добычи железа (Кулешевич и др., 2009).

Онежское озеро – это второе по величине озеро в Европе, реликт ОПО, является большим холодноводным водоемом, где в отличие от малых озер бассейна устойчивость экосистемы, сохраняющей олиготрофный статус, во многом определяется гидродинамическими процессами (Бояринов, 1990). Для Онежского озера характерен **гумусо-железо-кремниевый** тип озерного накопления (Белкина, 2015).

Изучение закономерностей формирования донных отложений Онежского озера включало исследование количественного и качественного состава вещества, поступающего от разных источников. В озеро ежегодно поступает 80 000–90 000 т взвешенных веществ (что не превышает 10 % от суммарного количества вещества, приносимого в водоем, главным образом реками), основная часть которых представлена обломочным материалом, состоящим из кварца и полевых шпатов. Поступление в озеро большого количества растворенного аллохтонного органического вещества гумусовой природы ($> 285 \text{ 000 т } C_{\text{орг}}$ в год), содержащих Fe и Mn, способствует развитию в воде деструкционных процессов и поступлению этих металлов на дно. Кислые горные породы водосборного бассейна являются источником поступления в озеро растворенного кремния (около 30 000 т в год), что вместе с длительным световым днем (до 20 часов, май–август) способствует развитию диатомового комплекса фитопланктона и поступлению биогенного кремния в донные отложения.

На основе расчета химического баланса Онежского озера с учетом кинетических параметров трансформации элементов в озерной экосистеме был оценен вклад обломочной составляющей (без эоловых поступлений) и внутриводоемных процессов в формирование донных отложений Онежского озера. Установлено, что из 170–190 тыс. т вещества, поступающего ежегодно в озеро и осаждающегося на дне, формируя донные отложения, 60 % составляет вещество с водосборной территории. Внутриводоемные процессы обеспечивают 40 % осадочного вещества (из них 18 % приходится на Si, 8 % на Fe, 4 % на

$S_{орг}$ и 2 % на Al). Средняя скорость осадконакопления для Онежского озера оценивается в интервале 0,2–0,4 мм/год уплотненного осадка (Белкина, 2018, 2020).

Большие размеры Онежского озера в условиях умеренного климата способствуют длительному пребыванию мелкодисперсного взвешенного вещества в водной толще, что влияет на степень преобразованности осадочного материала, поступающего в донные отложения. Распределение осадочного вещества контролируется динамикой вод и рельефом дна: глубоководная область центральных районов озера и северо-западных заливов (50 % от площади дна) покрыта алеврит-пелитовыми илами. Сложная морфология котловины и неравномерность антропогенного воздействия являются причиной существования в Онежском озере локальных бассейнов с различным режимом и скоростью седиментации, что в свою очередь способствует развитию гетерогенности экосистемы озера. По данным «прямых» наблюдений годового накопления взвешенного вещества в седиментационных ловушках для разных районов установлено, что скорость седиментации (τ) менялась от 0,1 до 3 см в год неконсолидированной взвеси (или от 0,1 и 2,8 мм/год уплотненного осадка). В центральных районах в настоящее время накапливаются минеральные биохемотропные осадки ($\tau < 0,5$ мм/год). В малых заливах Онежского озера встречаются осадки, обогащенные органическим веществом (τ от 0,2 до 5 мм/год), а в районах впадения рек оседают аллювиальные наносы (мощностью до нескольких см в год). В заливах, на берегах которых расположены крупные промышленные центры, формируются зоны, где донные отложения загрязнены взвешенным материалом сточных вод (τ до 30 мм/год). Донные отложения в целом наследуют минеральный состав обломочного материала, поступающего в озеро с речным стоком и аэрозолями. Среди аутигенных минеральных фаз преобладают опал, слагающий панцири диатомовых водорослей, Fe-иллит и Fe-хлорит. В составе осадка установлены также собственные минеральные фазы Fe и Mn (аморфный и кристаллический гётит, бернессит, прохроит, пиролюзит, вивианит, родохрозит, сидерит) (Strahovenko et al., 2019).

Ретроспективная оценка состояния поверхностных донных отложений озера по данным многолетних исследований (1960–2018 гг.) показала существенное изменение их химического состава и значительное увеличение ареалов загрязненных осадков в районах городов (в Петрозаводской, Кондопожской губах и Повенецком заливе). Например, активный гидродинамический режим Петрозаводской губы и седиментация веществ, поступающих со стоком рек Шуи, Неглинки и Лососинки, влияние промышленно-бытовых, ливневых и дренажных сточных вод г. Петрозаводска, расположенного вдоль западного берега залива, обуславливают значительную вариабельность в распределении донных отложений и их химического состава. Преимущественно илистые отложения губы содержат

в своем составе от 1,5 до 13 % органического вещества; величина атомного отношения C:N колеблется от 4 до 19; соотношение гуминовых и фульвовых кислот равно 0,7; содержание Fe варьирует от 2 до 10 %; Mn от 0,2 до 2 %; N_{общ} от 0,01 до 0,3 %; P_{общ} от 0,1 до 0,7 %. За последние 20 лет в донных отложениях из глубоководной части губы концентрация органического вещества увеличилась в 1,5 раза, а N и P – в 3 раза. В районе городского побережья в результате антропогенного влияния на глубине 15–20 м сформировалась зона техногенных накоплений, обладающих восстановительными свойствами, способная значительно влиять на качество вод губы. Концентрации тяжелых металлов здесь превышают кларковые значения: Cu – в 3–5 раз, Zn – в 2–6 раз, Cr и Pb – в 2 раза, Ni, V, Ti – в 1,5 раза. Петрозаводская губа подвергается постоянному загрязнению нефтепродуктами, периодически наблюдаются очень высокие их концентрации в донных отложениях городского побережья до 1 %, что на 3 порядка выше фоновых.

Сброс сточных вод целлюлозно-бумажного комбината (с 1929 г.) и хозяйственно-бытовых сточных вод г. Кондопоги, а также сток р. Суны оказывают значительное влияние на формирование донных отложений Кондопожской губы. Следствием распространения органического загрязнения по всей акватории залива являются очень высокие концентрации C_{орг} (до 57 %), S (до 1 %), N (до 1 %), P (до 0,7 %) и Fe (до 9 %) в вершинной части губы, а также устойчивый рост концентрации этих элементов в осадках глубоководной части губы. Содержание в донных отложениях Кондопожской губы пигментов, фенолов и лигносульфонатов (до 500, 55, 600 мкг·г⁻¹, соответственно) – самое высокое для осадков Онежского озера.

Донные отложения Большой губы Повенецкого залива формируются под влиянием хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод г. Медвежьегорска. Если в 1960-е гг. здесь были отмечены лишь участки локального промышленно-бытового загрязнения городского побережья, то современное состояние донных отложений свидетельствует о расширении зоны антропогенного влияния в сторону открытого плеса, где содержание органического вещества в донных отложениях увеличилось в 3 раза, азота в 2 раза, а фосфора больше, чем на порядок, и составляет 1,5, 0,5 и 0,3 %, соответственно.

В течение последних 10 лет в формировании донных отложений центральных районов Онежского озера прослеживается влияние выносимых из северо-западных губ загрязненных вод. Устойчивый рост содержания органического вещества, фосфора, азота, железа наблюдается и в песчаных отложениях южной части озера (по сравнению с 1970–1980-ми гг. их содержание увеличились в 2–2,5 раза), в илах Центрального Онего (в 2,5–3 раза) и в донных отложениях залива Большое Онего (в 4 раза). Содержание $\Sigma\text{Chl}_{a,b,c}$ варьирует по плесам: в Центральном районе изменяется от 0,4 до 3 мкг·г⁻¹, в Большом Онего от 5 до 25

мкг·г⁻¹, в Петрозаводском Онего от 14 до 31 мкг·г⁻¹. Для открытых глубоководных районов озера сохраняется закономерность увеличения концентраций органического вещества азота и фосфора с глубиной водоема от крупнозернистых осадков к тонкозернистым.

В целом акватория Онежского озера делится на 14 крупных районов (Центральное Онего, Большое Онего, Южное Онего, Малое Онего, Петрозаводская губа, Кондопожская губа, Лижемская губа, Горская губа, Уницкая губа, Повенецкий залив, Большая губа Повенецкого залива, Заонежский залив, Кижы, Великая губа) и более 30 малых губ и бухт (Святуха, Кефть, Челмужская, Оров-губа, Пергуба, Лумбушская, Пиньгуба, Ялгуба и другие), отличающихся седиментационным режимом и, как следствие, вещественным составом слагающих их донных осадков. Различия в процессе формирования донных отложений для разных районов Онежского озера, связанные как с естественными причинами (морфология котловины, речной сток, геологические и геоморфологические особенности водосбора и т. д.), так и с неравномерным распределением антропогенной нагрузки, явились основанием для разработки уникальной программы мониторинга донных отложений Онежского озера. Методические рекомендации для геомониторинга, представленные в диссертации, содержат информацию о месте расположения станций наблюдения, периодичности отбора проб, контролируемых характеристиках и фоновых концентрациях.

2. Начальные диагенетические преобразования в озерных донных отложениях влияют на глобальный перенос осадочного вещества, способствуя его дифференциации после осаждения из водной толщи в результате удержания или возврата основных элементов живого вещества (C, N, P, O, S, H, Si) и элементов, мигрирующих в водной среде с кремнием и органическим веществом (Fe, Mn, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb и др.).

Поверхностный слой донных отложений является сложной термодинамически неуравновешенной коллоидной смесью органоминеральных веществ разного генезиса. Вода и основные (фазовые) компоненты химического состава донных отложений создают среду, в которой происходят физические, химические и биологические процессы. Качественный состав и соотношение «фазовых» компонентов определяют кислотно-основные и окислительно-восстановительные условия, интенсивность и направление биогеохимических процессов и, как следствие, химические формы продуктов этих превращений. Различия миграционных характеристик разных форм химических элементов проявляются в виде перераспределения элементов в донных отложениях и обменных процессах на границе «вода — дно».

На основе изучения химического состава придонных и поровых вод, взвешенного вещества и донных отложений выполнена оценка роли донных отложений в процессе формирования химического состава вод озер северной гумидной зоны. Выявлено, что влияние донных отложений на химический состав вод определяется количественным и качественным составом органического вещества, осаждающегося на дно озер (Белкина, 2003, 2006, 2014).

Скорость осадконакопления для аккумуляционных зон изученных водоемов варьирует от 0,01 до 7 см в год неконсолидированного осадка. В составе взвешенного вещества преобладает алевритовая фракция (40–90 %). Химический состав взвесей, как правило, отличается от состава донных отложений более высоким содержанием органического вещества, а иногда и ряда химических элементов (As, Pb, Zn, Cu, Cr, Mn, Se, Cd, Sb и т. д.). Значимое (в 1,5–2 раза) различие концентраций биогенных элементов живого вещества (C, P, N) в свежесосажденном осадке и в донных отложениях, наблюдаемое как в больших, так и в малых водоемах независимо от их трофического статуса, и отличие химического состава поровых, надилловых и придонных вод указывают на поступление веществ из донных отложений в результате процесса деградации органического вещества. Интенсивность потоков вещества на границе «вода – дно» и степень влияния донных осадков на газовый, ионный, биогенный и микроэлементный состав придонных вод зависят от многих факторов. Наиболее важным из них является количественный и качественный состав органического вещества, который тесно связан с трофическим статусом водоема. Установлено, что накопление $C_{орг}$ и $N_{орг}$ в донных отложениях озер закономерно увеличивается при переходе экосистемы от олиготрофного к эвтрофному типу. Для фосфора эта закономерность соблюдается только для осадков с концентрациями железа $< 2\%$ (Белкина, 2011). Окислительно-восстановительные условия в донных отложениях озер разной степени трофности отличаются друг от друга. Редокс-граница в олиготрофных и мезотрофных озерах находится на глубине от контакта «вода – дно» около 2–5 см. Разложение органического вещества, поступающего в донные отложения олиготрофного водоема, происходит на поверхности отложений. В мезотрофном водоеме в этот процесс активно вовлечен и окисленный слой донного осадка (окислительный диагенез). Основная доля органического вещества, поступающего на дно эвтрофного водоема, разлагается в анаэробных условиях (редокс-граница совпадает с границей «вода-дно» – восстановительный диагенез). Интенсивность обменных процессов на границе раздела «вода – дно» увеличивается с ростом трофического уровня водоема. Величина биогенной нагрузки для озер изменяется в пределах от 0,001 до 4 мгР·м⁻²·сут.⁻¹ и от 0,05 до 40 мгN·м⁻²·сут.⁻¹ в виде нитратов или аммония. Донные отложения оказывают значительное влияние на

кислородный режим водоема. Поглощение кислорода донными отложениями зависит от трофического статуса водоема и колеблется от 0,01 до 0,1 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут.^{-1}$ для олиготрофных, от 0,1 до 1 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут.^{-1}$ для мезотрофных озер и более 1 г кислорода для эвтрофных озер (Белкина, 2017). Надиловые воды отличаются более высокими концентрациями углекислого газа и меньшим содержанием кислорода, более высокими значениями электропроводности по сравнению с водной толщей. Потоки минеральных компонентов изменяются от 10 до 150 мг·м⁻²·сутки⁻¹ (Белкина, 2019). Таким образом, влияние донных отложений на химический состав вод и миграционные характеристики элементов, участвующих в биологическом круговороте, возрастает с ростом трофического статуса водоема.

Онежское озеро в отличие от малых озер обладает большим объемом водной массы. Поэтому, мелкодисперсные частицы, прежде чем поступить на дно, проходят длительный путь трансформации в водной толще. Средняя скорость осадконакопления в Онежском озере значительно ниже, чем в малых водоемах. Продукционно-деструкционные процессы в водной массе контролируют поступление трудно минерализуемого гумусового органического вещества в донные отложения. Дальнейший процесс его разложения с участием бентических организмов зависит от диффузии кислорода в донные отложения. Соискатель рассматривает поверхностный слой как неоднородную систему, состоящую из нескольких зон (пограничный, окисленный, барьерный, восстановленный слои (рис. 3), каждая из которых является относительно изолированным местообитанием определенного сообщества, потребляющего органическое вещество.

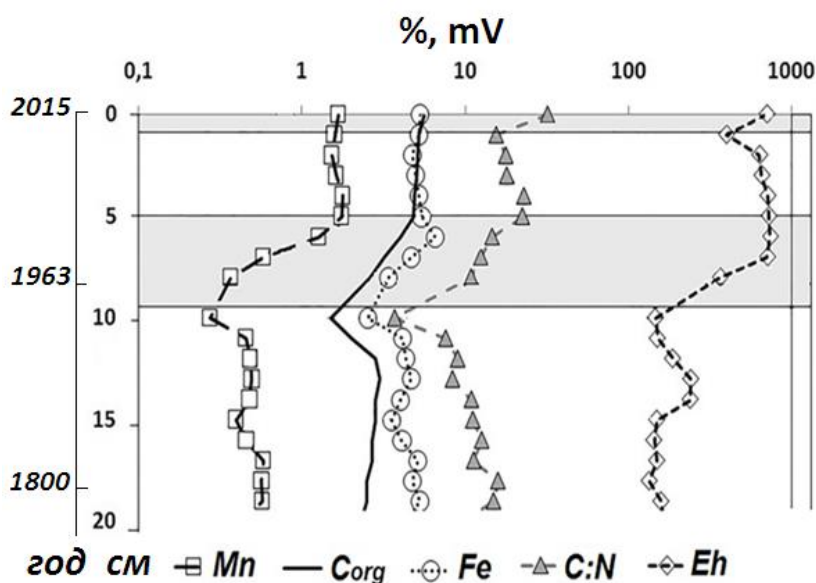


Рис.3. Распределение химических характеристик в поверхностном слое донных отложений Петрозаводской губы. I - IV – зоны преобразования органического вещества в процессе диагенеза: пограничный, окисленный, барьерный, восстановленный слои

Изменения Eh и концентраций редокс-чувствительных Fe, Mn и P по глубине происходят синхронно с $C_{\text{орг}}$, что позволяет уточнить границы слоев. На основании профиля концентрации $C_{\text{орг}}$ по градиентам $\Delta C/\Delta h$ в каждом слое оценена скорость разложения и с учетом мощности слоя – деструкция органического вещества в донных отложениях. Максимальная скорость разложения наблюдается в пограничном слое и в барьерной зоне, что на порядок выше, чем в восстановленном слое. Общая деструкция (для Петрозаводской губы Онежского озера – $28 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$), оцененная по «секционной» модели, сравнима с экспериментальными данными ($18\text{--}27 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$). В процессе деградации меняется и качественный состав органического вещества (табл. 2).

Таблица 2. Деструкция (D , $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$) органического вещества в донных отложениях Петрозаводской губы: $\Delta C/\Delta h$ – градиент концентрации $C_{\text{орг}}$ ($\text{мгС} \cdot \text{см}^{-1}$), τ – скорость осадконакопления ($\text{см} \cdot \text{год}^{-1}$), V_D – скорость деструкции ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{см}^{-1}$)

Зона	Слой, см	Формула	$\Delta C/\Delta h$	τ^*	V_D	D
I	0–0,3	$C_{15}(\text{H}_2\text{O})_{12}\text{O}_5\text{NH}_3$	1,29	0,20	7,04	2
II	0,3–5	$C_{[16-22]**}(\text{H}_2\text{O})_{[17-25]}\text{O}_{[4-7]}\text{NH}_3$	0,15	0,15	0,61	3
III	5–9	$C_{[15-4]}(\text{H}_2\text{O})_{[26-8]}\text{H}_{[1-14]}\text{NH}_3$	1,60	0,10	4,39	18
IV	9–24	$C_{[7-15]}(\text{H}_2\text{O})_{[12-30]}(\text{O}_{[0-1]}/\text{H}_{[0-2]})^{***}\text{NH}_3$	0,21	0,05	0,30	5

* Скорость седиментации определена по ^{210}Pb и ^{137}Cs .

** Число атомов изменяется от 16 до 22 вниз по вертикали осадка.

*** Присутствует небольшой избыток кислородных или водородных атомов.

Потребление кислорода (от $0,005$ до $4 \text{ мгO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$) и скорость деструкции (от $0,02$ до $64 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$) зависят от условий (глубина водоема, температура воды, количественный и качественный состав органического вещества осадков и т. д.). Минимальные значения относятся к песчаным илам южного Онега, а максимальные – к загрязненным осадкам Кондопожской губы. Поступление азота из донных отложений Онежского озера изменяется для осадков центральных районов от $0,01$ до $0,3$, для Петрозаводской губы – от $0,01$ до $3,5$, для Кондопожской губы – от $0,7$ до $5,5 \text{ мгN} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ (Белкина, 2015).

Впервые оценено изменение внутренней фосфорной нагрузки Онежского озера, формирующейся в условиях неравномерного антропогенного воздействия, которое доказывает важную роль донных отложений в поддержании олиготрофного трофического статуса его экосистемы (табл.3). Динамика изменения концентрации фосфора в донных отложениях Онежского озера соответствует характеру изменения внешней фосфорной нагрузки и во многом зависит от развития процессов антропогенного эвтрофирования в водоеме, поскольку более 40 % внешней нагрузки имеет антропогенную природу (Белкина, 2015; Лозовик и др. 2016).

Таблица 3. Внутренняя фосфорная нагрузка в Онежском озере в 2000 и 2010 гг.: I – Центральные районы, II – Кондопожская губа, III – Петрозаводская губа, IV – Повенецкий залив

Тип донных отложений	Н	Md	I		II		III		IV	
	м	мм	мг Р·м ⁻² ·сутки ⁻¹							
			2000	2010	2000	2010	2000	2010	2000	2010
Песок	0–25	> 0,1	0,01	0,001	–*	–	0,01	0,01	0,01	0,001
Алеврит	5–40	0,01–0,01	0,03	0,03	–	–	1,2	0,2	0,2	0,1
Тонкий алеврит	30–60	0,005–0,01	0,02	0,02	0,3	0,3	1,6	0,3	0,1	0,1
Пелит	50–100	< 0,005	0,08	0,01	0,01	0,01	–	–	–	–
Загрязненные осадки	0–35	0,1–0,005	–	–	0,9	1,4	3	0,9	–	–
Всего	т Р· год ⁻¹		85	20	26	29	49	11	37	26

* Нет данных.

Например, снижение концентрации фосфора в поверхностном слое озерных осадков в 2011–2016 гг. свидетельствует о процессах стабилизации экосистемы Онежского озера после периода интенсивной эвтрофикации в начале 1990-х гг., что привело к снижению внутренней фосфорной нагрузки по сравнению с данными начала XXI века (80 и 200 т в год, соответственно) (Белкина, 2017). В центральных глубоководных районах в водную толщу возвращается около 5 % поступающего фосфора. Из песков Южного Онега в результате неоднократного взмучивания, переноса и переотложения взвешенного материала обратно в воду возвращается 75 %. Удерживающая способность донных отложений Петрозаводской и Кондопожской губ, испытывающих прямое воздействие сточных вод, составляет 30–50%. По мере удаления зоны осадконакопления от источника загрязнения доля возврата фосфора из донных отложений в воду уменьшается. В среднем, в водную толщу возвращается менее 30 % фосфора, поступающего на дно, что составляет около 20 % от внешней нагрузки на озеро. Интенсивность обратного потока фосфора из донных отложений в воду, которая зависит от типа грунта и его количественного и качественного состава, изменялась за период наблюдения (1996–2010 гг.) от 0,001 до 3 мгР·м⁻²·сутки⁻¹ (табл. 3).

Высокие значения внутренней фосфорной нагрузки и ее существенные колебания во времени для донных отложений в районах Онежского озера, подверженных антропогенному воздействию, например, Кондопожской губе, связаны с неравномерным процессом накопления фосфора (рис. 4). Это проявляется в чередовании в донных отложениях слоев разной мощности, обогащенных органическими и неорганическими формами фосфора, как в твердой фазе осадка, так и в иловой воде.

Основными механизмами удержания растворимых форм фосфора в донных отложениях озера, образующихся в результате разложения органического вещества на стадии первичного диагенеза, являются сорбционные процессы на гидроксидах железа в области редокс-барьера. В дальнейшем по мере захоронения осадков в восстановительной среде происходит образование фосфата железа (вивианита?) (рис. 5).



Рис. 4. Изменение внутренней фосфорной нагрузки в донных отложениях Кондопожской губы Онежского озера (центральный район, глубина 80 м)

В Онежском озере обнаружены два типа стратификации донных отложений, формирование которых зависит от содержания в придонной воде кислорода и концентрации органического вещества (Белкина 2015, 2016; Страховенко и др., 2019; Strakhovenko et al., 2020). Эти выявленные два типа разрезов донных отложений отличаются между собой присутствием или отсутствием аутигенных минеральных фаз Fe и Mn с разной степенью восстановления и обособления по вертикали в осадке.

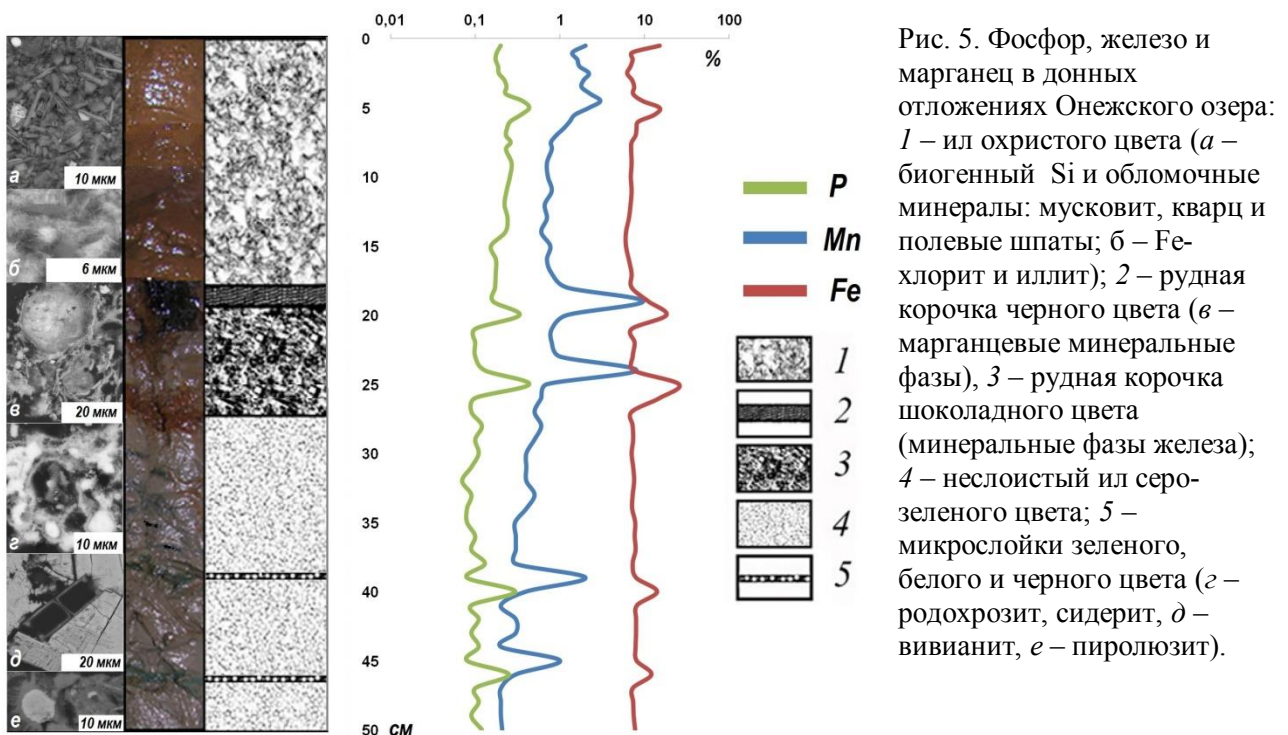


Рис. 5. Фосфор, железо и марганец в донных отложениях Онежского озера: 1 – ил охристого цвета (а – биогенный Si и обломочные минералы: мусковит, кварц и полевые шпаты; б – Fe-хлорит и иллит); 2 – рудная корочка черного цвета (в – марганцевые минеральные фазы), 3 – рудная корочка шоколадного цвета (минеральные фазы железа); 4 – неслоистый ил серо-зеленого цвета; 5 – микрослойки зеленого, белого и черного цвета (г – родохрозит, сидерит, д – вивианит, е – пиролюзит).

На окислительной стадии диагенеза в донных отложениях в зоне редокс-барьера происходит формирование рудных слоев, которые захораниваются в осадке. В строении слоя выделяется тонкий прослой из марганцевых микроконкреций (бернессит, пиролюзит), ниже которого в слое резко начинает преобладать гётит, с различной морфологией и степенью кристалличности выделений от микроконкреций до тонкоигольчатых, листоватых и псевдоморфоз по органическим остаткам. Ввиду отсутствия в донных отложениях

Онежского озера минералов глин, способных удерживать прочно фосфат-ионы на своей поверхности, фосфат железа является единственной аутигенной фазой, связывающей фосфор и локализирующей его в донном осадке. Вивианитовые слои ярко-зеленого цвета наблюдаются по всей толще отложений озера – от озерно-ледниковых ленточных глин позднего плейстоцена (отложения ОПО) до современных осадков. Следовательно, ключевыми факторами удержания фосфора в донных отложениях Онежского озера, не позволяющими ему возвращаться обратно в воду и способствующими развитию сообщества железобактерий, являются окислительные условия в зоне геохимического барьера и избыток железа, связывающий фосфор в фосфат железа. Таким образом, окислительный тип диагенетических преобразований, происходящих в поверхностном слое донных отложений, является важным стабилизирующим фактором для экосистемы Онежского озера, а биогеохимический механизм образования вивианита в донных отложениях – естественным механизмом, обеспечивающим устойчивость водоема к изменению внешней фосфорной нагрузки. Любые изменения валового и фракционного состава фосфора в осадках и в поровых водах, а также минеральный состав отложений являются индикаторами изменений продукционных процессов в озерной экосистеме, протекающих под влиянием климатических колебаний и антропогенного воздействия.

Выявленные закономерности трансформации фосфора в донных отложениях Онежского озера доказывают его значимую роль в фосфорной нагрузке на экосистему. В свете значимости этого фактора необходимо ввести обязательный контроль донных отложений в мониторинговых наблюдениях при оценке и прогнозировании развития водной экосистемы, с учетом различных климатических и антропогенных сценариев, обуславливающих изменение внешней фосфорной нагрузки.

3. Изменение седиментационного режима водоема в результате внешнего воздействия (независимо от его природы) влияет на пространственное распределение осадков и процессы окислительно-восстановительного диагенеза донных отложений, что проявляется в изменении количественных и качественных характеристик вещественного состава (как в твердой, так и в жидкой фазе), и в изменении характера обменных процессов на границе раздела «вода – дно».

Отклик донных отложений больших водоемов на внешнее воздействие, а именно, на загрязнение биогенными элементами (сточные воды), органическим веществом (отходы лесной и целлюлозно-бумажной промышленности) и токсическими веществами (тяжелые металлы и нефтепродукты), изучался на примере Онежского и Ладожского озер. Исследовался поверхностный слой донных отложений в этих озерах в пределах

геохимической барьерной зоны «вода – дно». Изменение физических и химических показателей донных отложений, придонных и поровых вод в результате антропогенного воздействия оценивалось на основе сравнительного анализа с показателями осадков, не подверженных данному виду воздействия (районы, удаленные от источников загрязнения и условно принимаемые за фоновые или более глубокие слои донных отложений, формировавшиеся в «доиндустриальную» эпоху).

В результате проведенных исследований на Онежском и Ладожском озерах было выявлено, что в условиях **органического и биогенного загрязнения** происходят следующие изменения в придонных водах и донных отложениях: (1) в надилловой воде (5 см от дна) по сравнению с водами придонных горизонтов (1 м от дна) наблюдалось снижение pH, Eh и концентрации O_2 , повышение содержания CO_2 (Белкина, 2006, 2007, 2015); (2) визуальные изменения осадков (грязно-серые, черные, пестрые осадки в районе Кондопожского ЦБК Онежского озера по сравнению со светлыми оттенками коричневых и серых илов на большей части озера) (Белкина, 1998, 2006, 2014); (3) нарушение закономерности увеличения влажности и пористости поверхностного слоя донных отложений с глубиной водоема, а также нарушение естественного хода этих величин по вертикали осадка (Белкина, 2006, 2018); (4) изменение физико-химических показателей донных отложений: снижение значений pH (на 0,3) и Eh (на 100–200 мВ) в поверхностном слое и изменение естественного распределения этих показателей по глубине осадка (рис. 6) (Белкина, 2003);

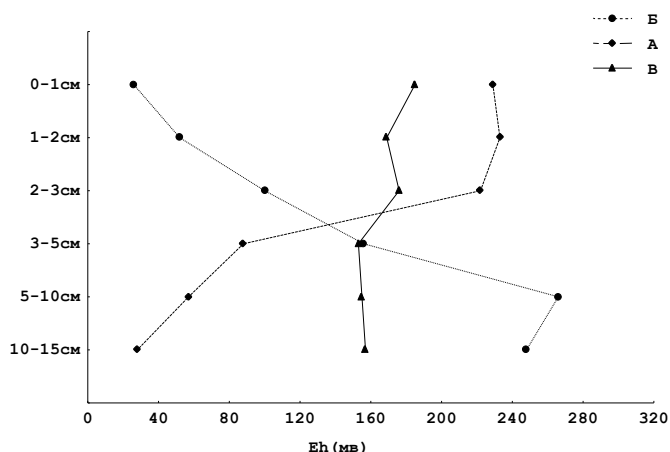


Рис. 6.

Изменение окислительно-восстановительного потенциала по глубине донных отложений Ладожского озера в зоне аккумуляции (А), в гидродинамически активной зоне (Б) и в зоне, подверженной антропогенному воздействию (В) (Белкина, 2003)

(5) увеличение содержания и изменение естественного распределения количественных и качественных показателей органического вещества ($ППП_{550}$, ГК, ФК, растительные пигменты, $C_{орг}$, P, N, S), проявляющееся в наличии локальных максимумов и минимумов на различной глубине донных отложений как в твердой фазе, так и поровых водах (Белкина, 1998–2018); (6) изменение естественного вертикального распределения Fe, Mn и редокс-форм элементов в донных отложениях и поровых водах вследствие их восстановления в

результате анаэробного разложения органического вещества (Белкина, 2011); (7) сокращение мощности окисленного слоя донных отложений в результате роста поглощения O_2 донными отложениями (Белкина 2006, 2011); (8) увеличение внутренней биогенной нагрузки. Величины потоков биогенных элементов в придонную воду из донных отложений, залегающих в зоне влияния сточных вод гг. Петрозаводска и Кондопоги, на 1–2 порядка превышают таковые из донных отложений, расположенных на достаточном удалении от точечных источников загрязнения и принимаемых за фоновые условия (см. табл. 3) (Белкина, 2015).

Загрязнение водоема токсическими веществами (нефтепродуктами и тяжелыми металлами) приводит к увеличению их концентраций в донных отложениях по сравнению с фоновыми характеристиками, изменению качественного состава нефтяных углеводородов и изменению естественного вертикального профиля распределения металлов: Fe, Mn, Cr, Sr, Ni, Mo, Co, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb (Белкина, 2005, 2006, 2016; Слуковский, 2018, 2020).

Климатические колебания и хозяйственная деятельность на водосборных территориях (сведение лесов, земледелие, мелиорация, закисление почв и т.д.) в последние 50 лет привели к более интенсивному выносу растворимого гумуса, Fe и Mn в водотоки (Калинкина и др., 2019) и, как следствие, накоплению этих металлов в донных отложениях в районах впадения рек, например, в р. Тохмаёки в Ладожском озере (содержание Fe превышает его кларковое значение в 5 раз, Mn – в 8 раз). Заметным является увеличение содержания железа и марганца в илах Петрозаводской губы (почти в 4 раза), куда впадает р. Шуя, или в донных отложениях центрального района Кондопожской губы, куда впадает р. Суна (содержание Fe увеличилось в 1,5–3 раза, до 8,3 %). Периодически фиксируются отклонения от монотонности распределения характеристик химического состава (E_h , pH, $C_{орг}$, P, Fe, Mn и др.) по глубине осадка, связанное с неравномерным поступлением веществ в донные отложения (Белкина, 2007, 2015, 2020).

Создание водохранилищ является одним из наиболее значительных видов вмешательства человека в естественные процессы эволюции ландшафта. Изменение седиментационного режима водоема в результате превращения озера в водохранилище изучалось на примере Выгозерского водохранилища ($S_b = 16800 \text{ км}^2$, $S_z = 1251 \text{ км}^2$). Литостратиграфический метод исследования донных отложений позволил разделить периоды истории водоема (ленточные глины приледникового озера, илы изолированного озера и антропогенно-модифицированные осадки водохранилища) и оценить объемы накопленного вещества. Показано, что после создания водохранилища (введение в эксплуатацию Беломорско-Балтийского канала в 1933 г.) на его дне аккумуляровались бурые

органические илы (440 млн м³; 170 млн т сухого грунта), объем которых в разы превышает объем озерных осадков (150 млн м³; 50 млн т), относящихся к периоду голоцена (рис. 6).

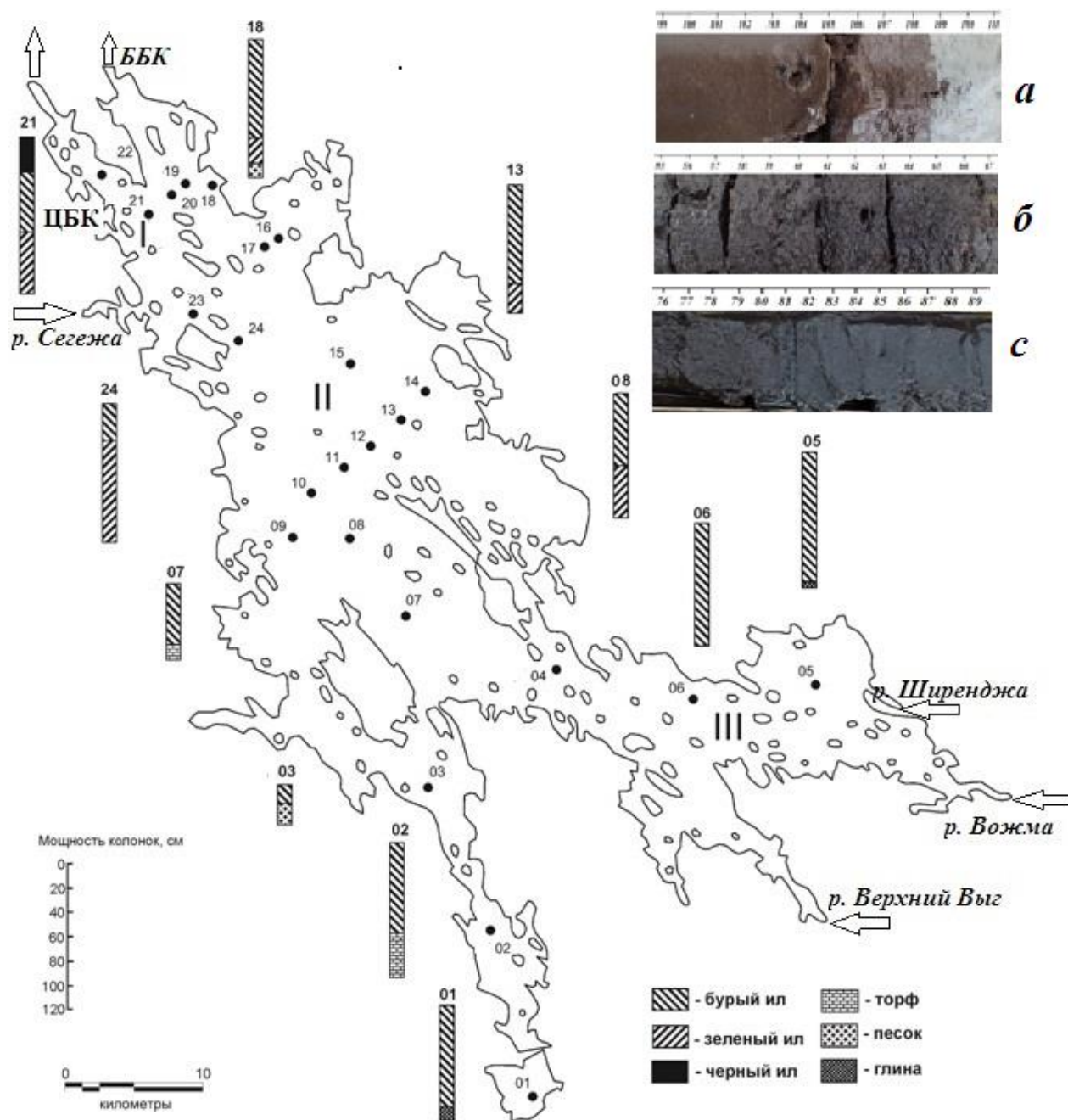


Рис. 6. Стратификация донных отложений Выгозерского водохранилища; I – Северное Выгозеро, II – Центральное Выгозеро, III – Южное Выгозеро. Зоны контакта, маркирующие изменение седиментационного режима: а – глина – бурый ил (ст. 05), б – торф – разнотерный обломочный материал (ст. 07), с – зеленый ил – бурый ил (ст. 09)

Выявлено, что пертурбация распределения гранулометрического состава, изменение цвета, количественных и качественных характеристик органического вещества (ППП, ХПК, C_{org} , P, N, S, гуминовые и фульвовые кислоты, пигменты, нефтепродукты и др.) и неорганических компонентов (зольность, металлы) в колонке донных отложений маркируют не только основные события превращения озера в водохранилище (затопление и завершение

перестроения котловины), но и этапы трансформации экосистемы в условиях неравномерного антропогенного воздействия и климатических изменений за последние полвека (Белкина, 2015, 2018).

Дифференциация процессов седиментогенеза, наблюдаемая в Выгозерском водохранилище, обусловлена главным образом геоморфологическими особенностями котловины, регулируемым гидрологическим режимом и неравномерным распределением речного стока и антропогенной нагрузки. Акваторию водоема можно разделить на три части: северную, центральную и южную. Накопление донных отложений Северного Выгозера происходит в условиях высокой проточности под влиянием самого крупного притока – р. Сегежи, впадающей с запада и формирующей транзитное стоковое течение в северо-западном направлении, а также под действием рассеивающего выпуска сточных вод Сегежского ЦБК. Седиментационный режим центрального района (в прошлом дно оз. Выгозеро) соответствует озерному типу. Седиментационную обстановку в мелководной юго-восточной части водохранилища, куда впадает несколько рек, как и в случае Северного Выгозера, можно охарактеризовать как аккумулятивно-транзитную. Несмотря на то, что процесс формирования котловины водохранилища в основном был завершён к 1970-м гг., активные абразионные процессы, особенно в северной его части, наблюдаются и в настоящее время (Потехин и др., 2019).

Уникальное сочетание для Северного Выгозера природных и антропогенных факторов определяют особый седиментационный режим с высокими скоростями осадконакопления. В этом районе наблюдается максимальная нагрузка взвешенными веществами. Около $20 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ поступает с водами р. Сегежи, от 10 до $110 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ – с твердым стоком ЦБК и от $100 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ и выше – в результате абразии. Ретроспективная оценка изменений в донных отложениях за полувековой период наблюдений показала, что распределение осадков и химический состав связаны с количественным и качественным составом сточных вод Сегежского ЦБК (Васильева, 1975, 1985; Белкина, 2015, 2018). До 1976 г. весь объем сточных вод комбината поступал в Лайкоручей (приустьевая часть р. Сегежи), где твердые органические отходы в виде щепы, коры, древесных и бумажных остатков занимали около 6 км^2 . Нарастание производственных мощностей и изменение технологии, перенос выпуска в Мозог-губу и введение станции биологической очистки привели к постепенному распространению техногенных взвесей (осадок черного цвета) по всей акватории. Уже к 1983 г. в районе Северного Выгозера выделяются 4 зоны донных отложений, отличающихся количественным и качественным составом органических веществ, биогенных элементов, металлов, визуальными и физико-химическими характеристиками. Это: (1) Лайкоручей, (2) Мозог-губа, являющаяся естественным

отстойником сточных вод, и примыкающая к ней Лейгуба, (3) глубоководная центральная часть Северного Выгозера и Майгуба, (4) Сенная губа (Васильева, 1985). В настоящее время в глубоководной части дна мощность слоя осадков, загрязненных отходами ЦБК, около 30 см, что соответствует средней скорости накопления 7 мм в год. Количество техногенных осадков, накопленных на дне в северной части водоема с момента пуска ЦБК оценивается в 12 млн м³ (около 2 млн т сухого вещества) (Поляков, 1975; Потахин и др., 2018, 2019, 2020). Постепенное снижение поступления на дно абразивного материала (по мере формирования профиля равновесия котловины) и техногенных взвесей (экономический спад 1990-х гг.) привело к увеличению вклада в процесс формирования донных отложений водохранилища взвешенного вещества притоков и биогенной седиментации. Так, в Северном Выгозере скорость осадконакопления уменьшилась до 0,6 мм в год неконсолидированного осадка, что соответствует 0,5 г·м⁻²сут.⁻¹.

В поверхностном слое донных отложений уменьшилось содержание органического вещества и биогенных элементов, увеличилась концентрация железа. Однако осадки по-прежнему отличаются качественным составом органического вещества и более высокими концентрациями тяжелых металлов (как специфических загрязнителей V, Ni, так и металлов дальнего переноса Pb, Cd, Sb и др.) и серы (рис. 7).

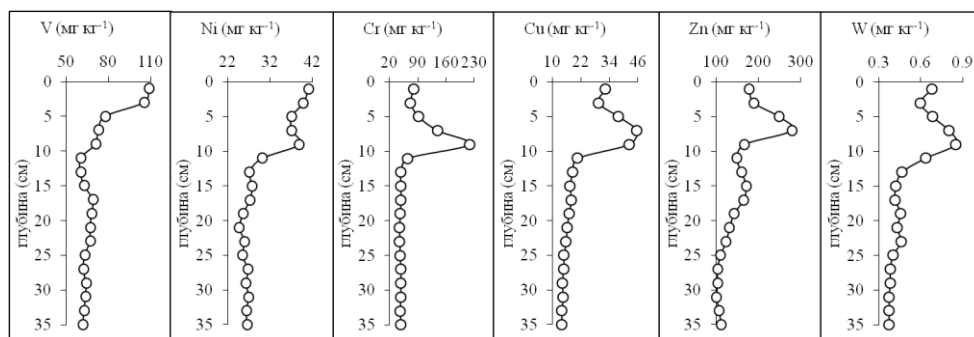


Рис. 7.
Тяжелые металлы в донных отложениях Северного Выгозера, ст. 21 (Слуковский и др., 2020)

Донные отложения, залегающие во впадинах по пути распространения сточных вод, характеризуются нестабильными окислительно-восстановительными условиями и более интенсивными обменными процессами на границе «вода – дно» по сравнению с другими районами. Присутствие серы, источником которой являются сточные воды, способствует развитию сульфатредукции в донных отложениях этого района, что нехарактерно для большинства водоемов изучаемого региона, где окислителем в процессе деструкции органического вещества чаще всего выступают кислород и железо (Белкина, 2015, 2018).

В конце XX века снижение содержания органического вещества и рост концентраций биогенных элементов, железа и марганца в поверхностном слое донных отложений были зафиксированы для всех районов Выгозерского водохранилища. Улучшение кислородного режима водоема в центральном районе благоприятствовало формированию озерных руд (в прошлом процесс был характерен и для оз. Выгозеро), которые стали механическим барьером, способствующим захоронению поступившего ранее на дно материала и препятствующим транспорту веществ, образующихся в процессе диагенетических преобразований из осадков обратно в воду. При дефиците растворенного кислорода в придонных водах в зимний период неоднократно фиксировалось поступление Fe^{2+} , Mn^{2+} , растворимых органических веществ, соединений фосфора и азота из донных отложений. Наиболее ярко этот эффект проявился в 2009–2010 гг., когда за счет поступления железа из донных отложений его содержание в воде водохранилища увеличилось в 2 раза и достигло максимальных значений (более 1 мг/л), а содержание железа в донных отложениях снизилось более чем в 2 раза (Белкина и др., 2018). Это еще раз доказывает, что донные отложения играют важную роль в формировании химического состава вод не только малых озер, но и крупных водоемов.

Донные отложения Южного Выгозера формировались в основном на затопленных участках суши. В отличие от центрального района, где существовал длительный переходный период переформирования котловины, отмеченный постепенным снижением доли минерального компонента в составе осадка, изменение соотношения органического и минерального вещества в донных отложениях (с 0,02 на 0,5) здесь происходит мгновенно, что фиксируется визуально (рис. 6). В процессе деструкции органического вещества, источником которого в настоящее время является погруженная водная растительность мелководья и почвенный гумус, важную роль играет метаногенез (содержание CH_4 в слое (0–2 см) в 2 раза больше, чем в осадках центрального и северного районов).

Таким образом, исследования донных отложений Ладожского и Онежского озер и Выгозерского водохранилища показало, что любое внешнее воздействие на континентальный водоем может иметь отдаленные последствия в результате изменения окислительно-восстановительных условий в барьерной зоне «вода – дно», проявляющиеся в виде неконтролируемого диффузного или «залпового» поступления преобразованных в процессе диагенеза веществ (в том числе загрязнителей, обладающих токсическим эффектом) из донных отложений обратно в воду.

4. Индикаторная оценка отклика водоема на внешнее воздействие проводится по совокупности физических и химических характеристик воды и донных отложений, описывающих ранние диагенетические преобразования осадка на границе «вода – дно» с учетом поставленной экологической задачи и характера антропогенного воздействия. Список оцениваемых характеристик включает: (1) основные компоненты, формирующие среду (кремний, органическое вещество и железо), и ее физические и физико-химические показатели, (2) элементы, лимитирующие развитие экосистемы, и (3) загрязняющие вещества (отходы ЦБП, нефтяные углеводороды, тяжелые металлы и т.д.).

Задача оценки состояния водоема предполагает применение определенной совокупности критериев, достоверно описывающих озеро и границы устойчивости его экосистемы и позволяющих прогнозировать ее изменения в результате внешнего воздействия. Возможности использования характеристик донных отложений в качестве таких критериев до настоящего времени остаются недостаточно исследованными. Донные отложения, залегающие в аккумуляционных зонах озера, где накопление вещества происходило непрерывно, наиболее полно отражают глобальные и локальные изменения природно-климатической обстановки, геологические особенности водосбора и влияние хозяйственной деятельности человека. Выбор характеристик донных отложений, которые могли бы служить критериями оценки современного состояния озера, по мнению соискателя, должен быть основан на учете основных факторов, влияющих на формирование осадков. Так, основные контролирующие осадконакопление факторы – климат и состав пород восточного склона Фенноскандинавского щита определяют общие для всех озер региона химические характеристики осадков (тип озерного накопления), локальные условия водосбора и различия в антропогенной нагрузке (индивидуальные химические характеристики донных отложений для каждого водоема). В условиях гумидного климата в озерах Карелии кремний, гумус (органическое вещество) и железо являются основными компонентами современных донных отложений и создают осадочную среду, в которой происходят процессы трансформации веществ, поступающих на дно водоема. Это, безусловно, является достаточным основанием для включения физических, физико-химических, химических характеристик, отражающих процесс накопления и преобразования кремния, органического вещества и железа в донных отложениях, в систему общей оценки седиментогенеза, а также использования в качестве критериев, определяющих состояние озера.

Свежеосажденный осадок представляет собой открытую, динамическую, неравновесную, коллоидно-дисперсную систему, в которую непрерывно поступает новое

взвешенное вещество разного генезиса. Ведущими процессами на стадии первичного диагенеза являются процессы окисления органического вещества. Окислительно-восстановительная обстановка в донных отложениях определяет формы существования элементов и их подвижность, интенсивность деструкции и минерализации органического вещества и других биохимических превращений, а также влияет на численность и активность бентосных организмов. Интенсивность редокс-процессов в свежееобразованном осадке определяется степенью его разложения и метаморфизации в ходе транспортировки через водную толщу, а также соотношением органического вещества (качественным и количественным составом) и окисленных форм элементов. Окислительно-восстановительные процессы отражают не только состояние донных отложений, но и в силу граничного положения поверхностного слоя осадка между литосферой и гидросферой состояние экосистемы водоема в целом. Сложность состава и структуры пограничного слоя «вода – дно» определяет необходимость использования целого набора разных характеристик, описывающих окислительно-восстановительные процессы в донных отложениях.

В качестве основного критерия экологической оценки отклика водоема на внешнее воздействие соискатель предлагает комплекс характеристик состава и свойств донных отложений, отражающий окислительно-восстановительный процесс разложения органического вещества. Восстановитель – это органическое вещество, которое в зависимости от задачи можно описать такими характеристиками как, ППП_{550} , $\text{C}_{\text{орг.}}$, ХПК, гуминовые и фульвовые кислоты, растительные пигменты и токсичные чужеродные органические вещества (летучие фенолы, нефтепродукты, лигносульфонаты и др.). Окислителями являются неорганические соединения. К ним относятся кислород (контроль по мощности окисленного слоя, по суточному потреблению кислорода илом и содержанию продуктов окисления органического вещества кислородом, таких, как CO_2 , сульфаты, нитраты, ортофосфаты), а также окислители неорганической части осадка (общее содержание Fe, Mn, S в твердой фазе и в поровых водах (система $\text{Fe}^{2+,+3}$, Mn^{+2} , формы азота NO_2^- , NH_4^+ , NO_3^- и фосфора, H_2S , SO_4^{2-} и др.)). Среду в которой происходит процесс описывают физические (гранулометрический состав, естественная влажность, пористость, удельная плотность, электропроводность), физико-химические (pH, Eh) характеристики и зольность. Если в результате внешнего воздействия в водоем поступают загрязняющие вещества, чуждые экосистеме, то контроль над их содержанием и их формами в зависимости от условий среды и их трансформацией также необходим. Количественными характеристиками редокс-процессов, протекающих на ранней стадии диагенеза в донных отложениях, являются скорость деградации органического вещества, поступление веществ

из донных отложений и удерживающая способность донных отложений по отношению к загрязняющим веществам.

Представленный комплекс характеристик был применен на практике для оценки состояния водоемов Карелии в рамках ряда научно-исследовательских проектов и хозяйственных договоров.

(1) На основе изучения химического состава донных отложений Кондопожской губы Онежского озера было показано, что пространственная и временная изменчивость химического состава донных отложений залива, испытывающего длительное антропогенное воздействие сточных вод ЦБП, тесно связана как с объемами производства, так и с качественным составом сточных вод комбината. Распределение донных отложений характеризует экологическое состояние отдельных районов залива. Химический состав осадков, характер накопления и трансформации органических веществ донных отложений позволяют условно разделить акваторию губы на три части: вершинную и переходную зоны, а также центральный глубоководный район (Белкина, 2005, 2007, 2014). Донные отложения, подверженные интенсивному антропогенному воздействию, залегающие в вершинной части залива на площади 17 км², сформированы отходами ЦБК. Объем техногенных осадков оценивается около 4 000 000 м³, что с учетом влажности накоплений составляет 600 000 т сухого вещества, причем основная масса (около 500 000 т) сосредоточена на площади около 5 км², прилегающей к комбинату. Осадки отличаются низкими значениями Eh (до –189 мВ) и pH (до 5,2), количественным и качественным составом органического вещества. Содержание в поверхностном 5 см слое отложений C_{орг.} (до 38 %), N_{орг.} (до 1 %), концентрации фенолов (до 55 мкг·г⁻¹), лигносульфонатов (до 600 мкг·г⁻¹), а также величины потребления кислорода (до 39 мгO₂·г⁻¹·сутки⁻¹), C:N (до 44) и C:P (до 400) и поступление минеральных веществ из донных отложений в воду (1,3 г·м⁻²·сутки⁻¹) в 100–1000 раз превышают фоновые характеристики Онежского озера. Органическое вещество донных отложений переходной зоны (на удалении 4–10 км от ЦБК в сторону открытого озера) формируется главным образом за счет седиментации мелкодисперсных взвесей стоков, прошедших биологическую очистку и обогащенных N, P и S. Высокие концентрации в поверхностном 5 см слое донных отложений азота (до 1 %), фосфора (до 0,3 %), серы (до 0,7 %), железа (до 7 %) и марганца (до 4 %), максимальное содержание нефтепродуктов (до 300 мкг·г⁻¹) и растительных пигментов (до 500 мкг·г⁻¹), состав поровых вод и поступление минеральных веществ из донных отложений в воду (0,9 г·м⁻²·сутки⁻¹) указывают на интенсивное развитие процессов эвтрофирования в этом районе залива. В мелкодисперсных илах центрального глубоководного района губы в настоящее время вследствие накопления в них веществ автохтонного происхождения и трансформированных техногенных взвесей увеличиваются

концентрации С, Р и Fe. Поверхностный слой (1–10 см) является окисленным (Еh до 490 мВ). По мере продвижения в сторону открытого озера содержание $C_{орг}$ (2–9 %), фенолов (2–30 $мкг \cdot г^{-1}$), растительных пигментов (6–200 $мкг \cdot г^{-1}$), нефтепродуктов (4–30 $мкг \cdot г^{-1}$), величина отношения С:N (10–31) снижаются, возрастает концентрация $N_{орг}$ (0,3–0,7 %), растет гуминовый коэффициент (0,1–0,3). Выполненные исследования позволили построить карты экологически-опасных зон.

(2) Оценка нефтяного загрязнения Петрозаводской губы Онежского озера показала, что аварийный сброс нефтепродуктов в Петрозаводскую губу зимой 2001 г. не привел к катастрофическим последствиям не только благодаря испарению и активной динамике вод, но и поступлению тяжелых фракций (более 500 т) за счет сорбции на взвешенных частицах в донные отложения. На основе определения качественного состава фракции CCl_4 из донных отложений было доказано антропогенное происхождение углеводородов. Установлено, что 85 % всех органических соединений-экстрактов составляли неидентифицированные высокомолекулярные нефтяные углеводороды (С более 31) и их производные с полярными группами. Основными идентифицированными соединениями являлись алканы линейного строения и алифатические галогенопроизводные, алкильные производные полиароматических углеводородов. Наиболее высокий уровень загрязнения донных отложений (до 4000 $мкг \cdot г^{-1}$, что в 200 раз превышает фоновые концентрации) был зафиксирован в 2001 г. в районе нефтебазы на площади 17 $км^2$. Так, в литоральной зоне этот показатель составлял 20–120 $мкг \cdot г^{-1}$ (в 10–60 раз выше фона), в районе устья р. Лососинки (притока Онежского озера) превышение фона на площади 2 $км^2$ достигло значений в 10–20 раз больше, в глубоководной части напротив нефтебазы – превышение было в 5 раз. Дальнейшие наблюдения показали, что полное очищение водной массы залива произошло через год после аварии, в то время как концентрации в донных отложениях оставались высокими. Причем произошло расширение зоны загрязнения нефтепродуктами вдоль городского побережья (до 60 $км^2$). Процесс самоочищения донных отложений, который занял более 5 лет, стал возможен благодаря присутствию кислорода в поверхностном слое донных отложений, способствующему развитию нефтеокисляющих и фенолрезистентных бактерий. С 2002 по 2006 г. произошло значительное сокращение концентрации основных идентифицированных нефтяных углеводородных фракций: алканов – в 8,4 раза, метилнафталинов – в 2,2 раза, диметилнафталинов – в 4,6 раза. Хотя концентрации нефтяных углеводородов в донных отложениях залива постепенно снижались, но в районе сброса сточных вод г. Петрозаводска периодически фиксировались высокие значения. Стратификация отложений (наличие битумных слоев мазута) в Петрозаводской губе в

районе нефтебазы указывает на периодический характер загрязнения (Белкина, 2006, 2008, 2009).

Изучение нефтяных углеводородов в донных отложениях водоемов Беломорско-Балтийского канала показало хронический характер загрязнения озер водным транспортом. Тяжелые фракции нефтяных углеводородов вследствие климатических условий севера, морфометрических особенностей водоемов ББК, относительно высоких скоростей осадконакопления и восстановительных условий среды, накапливаются в донных отложениях. Захоронение нефтепродуктов превращает донные отложения в опасный источник вторичного загрязнения и может иметь серьезные экологические последствия, например при дноуглубительных работах.

(3) Оценка загрязненности донных отложений озер была включена в программу мониторинга водных объектов Карелии в 1990–2006 гг. и проводилась с участием соискателя (36 озер, в том числе Онежское и Ладожское озера и Выгозерское водохранилище) (Белкина, 1998–2003, 2006, 2009). Например, было выявлено негативное влияние антропогенных факторов на формирование химического состава донных отложений северной части Ладожского озера. Показано, что поступление сточных вод способствует более быстрому осадконакоплению и аккумуляции продуктов неполной переработки органических веществ. Донные отложения содержат много гуминовых веществ, аммонийного азота, загрязнены нефтепродуктами и некоторыми тяжелыми металлами. Установлено, что наиболее загрязненными районами являются Питкярантский, Сортавальский и Лахденпохский заливы. Очень высокие концентрации *Chl a* и особенно, феофитина указывают на интенсивную эвтрофикацию этих районов. Восстановительный характер илов определяет развитие здесь вторичного загрязнения вод.

(4) В рамках хозяйственных договоров по оценке влияния рыбоводства на водоемы Карелии было установлено, что по данным контроля качества воды, принятых в нормативах условий содержания рыб, сделать выводы о воздействии форелевого хозяйства на озеро практически не представляется возможным. Наблюдения за изменением pH, Eh, содержания органического вещества и биогенных элементов в донных отложениях, залегающих в садковой зоне и прилегающей акватории, а также за скоростью седиментации в аккумуляционных зонах озер, показали, что объемы производства рыбы в малых водоемах и в заливах Ладожского озера превышают очистительные возможности озерных экосистем.

Выводы

1. Выявлены пространственные закономерности озерного осадконакопления водоемов гумидной зоны. Неравномерное распределение осадочного вещества в пределах единого территориально-природного комплекса определяется региональными (геологические условия водосборных территорий озер, морфология озерных котловин) и локальными (ландшафтно-климатические условия, антропогенная нагрузка) факторами, которые контролируют гидрологический, термический, химический и биологический режим водоемов, определяют соотношение взвешенных веществ разного генезиса (обломочные, хемогенные, биогенные, антропогенные), поступающих в донные отложения, и индивидуальные химические характеристики донных отложений в каждом водоеме. Проявление седиментационной дифференциации и осадочной интеграции взвешенного вещества в виде вертикальной (в водной толще) и батиметрической (по площади дна) зональности его распределения в водоеме увеличивается с ростом размеров озера.

2. Выявлены временные закономерности озерного осадконакопления водоемов гумидной зоны. Дегляциация изучаемой территории и временная последовательность изоляции малых озер от Онежского приледникового озера определила формирование разнообразных и разновозрастных озер, что в совокупности с размерами озер, особенностями их геолого-геоморфологического местоположения, спецификой почвенно-растительного покрова и климата определило разную скорость эволюционного развития озерных экосистем. В настоящее время независимо от своего расположения (на ледораздельных возвышенностях, озерных равнинах или на территориях развития денудационно-тектонического рельефа) озера с площадью зеркала менее 1 км² перешли на стадию накопления органического вещества. В озерах с площадью зеркала более 10 км² формируются неорганические осадки.

3. Выявлены общие черты седиментогенеза водоемов гумидной зоны. Климатические условия и состав горных пород восточного склона Фенноскандинавского щита определяют общие для всех озер региона химические характеристики донных отложений (макросостав): кремний, гумус (органическое вещество) и железо составляют основную массу вещества современных донных отложений, а их соотношение определяет тип озерного накопления.

В озерах юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита в настоящее время формируются донные отложения смешенного типа: железо-гумусо-кремниевые, железо-кремне-гумусовые или гумусо-железо-кремневые. Озера с доминированием донных отложений гумусового, кремниевого или железистого типа встречаются редко.

4. Выявлены различия в процессе накопления химических элементов в донных отложениях. В донных отложениях накапливаются химические элементы, мигрирующие в водной среде с кремнием, гумусом и железом (O, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Sr, Ni, Mo, Co, S, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb и тд.), поведение которых зависит от фазового состояния системы. Соотношение «фазовых» (Si, Fe, органическое вещество) компонентов определяет кислотно-основные и окислительно-восстановительные условия в донных отложениях и, как следствие, химические формы и миграционные характеристики, что проявляется в различной степени участия элементов в обмене веществом на границе «вода – дно».

5. Выявлены закономерности диагенеза в озерных отложениях в условиях гумидного климата и Fe-Mn провинции. Влияние первичных диагенетических преобразований в донных отложениях на дифференциацию вещества в осадочном процессе в континентальном водоеме увеличивается с ростом трофического уровня. Установлено, что процесс трансформации органического вещества в донных отложениях Онежского озера (гумусо-железо-кремнеземистого типа) в окислительной обстановке на ранней стадии диагенеза, приводящий к образованию аутигенных минералов железа и марганца, является ведущим геохимическим процессом, обеспечивающим устойчивость экосистемы Онежского озера к внешним воздействиям естественной и антропогенной природы за счет изъятия фосфора из внутриводоемного цикла в результате его удержания и захоронения в донных отложениях. Выполнена оценка удерживающей способности донных отложений Онежского озера по отношению к биогенным элементам. Показано изменение внутренней нагрузки в течение 40 лет наблюдений под влиянием климатических и антропогенных факторов.

Впервые получены кинетические параметры процесса трансформации органического вещества в донных отложениях, оценены потоки вещества на границе «вода – дно» и определена степень влияния донных отложений на формирование химического состава поверхностных вод и удерживающая способность донных отложений по отношению к поллютантам и лимитирующим развитие экосистемы биогенным элементам в зависимости от трофности водоема и антропогенного воздействия.

6. Выявлены деформации в условиях седиментогенеза и диагенеза под воздействием антропогенных факторов. Ретроспективная оценка изменений вещественного состава донных отложений Онежского озера показала, что за 50 лет наблюдений наиболее значительные изменения химического состава осадков произошли в крупных северо-западных заливах с высоким уровнем антропогенной нагрузки (Петрозаводская губа, Кондопожская губа, Большая губа Повенецкого залива), а также в заливе Большое Онего и Центральном Онего. В донных отложениях указанных районов наблюдается устойчивый

рост концентрации органических веществ, биогенных элементов, Fe, Mn, Na, K, Mg, Al, Ca, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Pb, нарушаются закономерности их пространственного распределения.

Формирование нового ложа и выравнивание рельефа дна Выгозерского водохранилища завершились в 1980-х гг. Изменения в лито-стратиграфии, гранулометрическом и химическом составе донных отложений по глубине колонки являются индикаторами трансформаций седиментационного режима водоема в последние 100 лет. Различия в процессах осадконакопления в разных районах Выгозерского водохранилища на современном этапе развития водоема определяются геоморфологическими особенностями котловины, регулируемым гидрологическим режимом и неравномерным распределением речного стока и антропогенной нагрузки.

Доказано, что совокупность физических и химических характеристик воды и донных отложений, описывающих ранние диагенетические преобразования осадка на границе «вода – дно», является критерием оценки состояния большого озера и его отклика на внешнее воздействие. Комплекс характеристик, отражающий окислительно-восстановительный процесс разложения органического вещества (восстановитель – органическое вещество, окислитель – кислород, марганец, железо, сера и показатели среды, в которой происходит процесс) и количественные характеристики процесса (скорость деградации органического вещества, поступление веществ из донных отложений и удерживающая способность донных отложений по отношению к загрязняющим веществам), был апробирован в мониторинговых исследованиях малых и больших озер Карелии, в том числе для оценки загрязнения Кондопожской и Петрозаводской губ Онежского озера, Выгозерского водохранилища и северной части Ладожского озера.

Список публикаций по теме исследования

В изданиях из перечня ВАК по специальности 25.00.36 – геоэкология (Науки о Земле)

1. **Белкина Н.А.** Оценка загрязненности донных отложений северной части Ладожского озера / Н.А. Белкина, Е.П. Васильева // Водные ресурсы. – 1999. – Т. 26. – №1. – С. 111–114. 0,5/0,4 п. л.
2. **Белкина Н.А.** Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера / Н.А. Белкина // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32. – №6. – С. 689–699. 1 / 1,6 п. л.
3. **Белкина Н.А.** Загрязнение нефтепродуктами донных отложений Петрозаводской губы Онежского озера / Н.А. Белкина // Водные ресурсы. – 2006. – Т. 33. – №2. – С.181–187. 1 / 1 п. л.
4. **Белкина Н.А.** Распределение и трансформация нефтяных углеводородов в донных отложениях Онежского озера / Н.А. Белкина, А.В. Рыжаков, Т.М. Тимакова // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. – №4. – С.472–481. 0,7 / 1,0 п. л.
5. **Белкина Н.А.** Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Сб. Водные проблемы Севера и пути их решения / Н.А. Белкина // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2011. – №4. – С.35–42. 1 / 0,9
6. **Белкина Н.А.** Нефтяные углеводороды в водоемах Беломорско–Балтийского канала / Н.А. Белкина, О.В. Панюшкина // Вода, химия и экология. – 2013. – №11. – С. 16–20. 0,8 / 0,8 п. л.

7. Калинкина Н.М. Биоиндикация состояния глубоководных участков Петрозаводской губы Онежского озера по показателям макрозообентоса / Н.М. Калинкина, Т.Н. Полякова, **Н.А. Белкина**, М.Т. Сярки // Водные ресурсы. – 2013. – Том 40. – №5. – С. 488–495. 0,2 / 0,2 п. л.
8. Калинкина Н.М. Биотестирование токсичных донных отложений крупных водоемов Северо–Запада России с использованием Ракообразных / Н.М. Калинкина, Н.А. Березина, А.И. Сидорова, **Н.А. Белкина**, А.К. Морозов // Водные ресурсы. – 2013. – Том 40. – №6. – С. 612–622. 0,2 / 0,3 п. л.
9. **Белкина Н.А.** Изменение окислительно–восстановительного состояния озерных донных отложений под влиянием антропогенных факторов (на примере Ладожского и Онежского озер) / Н.А. Белкина // Общество. Среда. Развитие. – 2014. – №3. – С. 152–158. 1 / 0,9 п. л.
10. **Белкина Н.А.** Ретроспективная оценка состояния донных отложений Выгозерского водохранилища / Н.А. Белкина // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41. – №3. – С. 258–268. 1 / 1,6 п. л.
11. **Белкина Н.А.** Химический состав донных отложений северной части Ладожского озера как показатель многолетней изменчивости экосистемы водоема / Н.А. Белкина, Д.А. Субетто, Н.А. Ефременко, М.С. Потахин, Н.В. Кулик // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2015. – №9. – С. 53–61. 0,6 / 0,7 п. л.
12. **Белкина Н.А.** Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера / Н.А. Белкина, Д.А. Субетто, Н.А. Ефременко, Н.В. Кулик // Наука и образование. – 2016. – №3(83). – С. 135–139. 0,8 / 0,8
13. **Белкина Н.А.** Количественный и качественный состав органического вещества и его трансформация в поверхностном слое донных отложений Онежского озера / Н.А. Белкина // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2017. – №10. – С. 64–72. 1 / 1,2 п. л.
14. **Белкина Н.А.** Особенности процесса трансформации органического вещества в донных отложениях озер Карелии и его влияние на химический состав придонных вод / Н.А. Белкина // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2019. – Т.5(15). – №4. – С. 262–275. 1 / 1,2 п. л.
15. Потахин М.С. Особенности генезиса котловин и строения донных отложений озер юго–восточного склона Фенноскандинавского кристаллического щита / М.С. Потахин, **Н.А. Белкина**, Д.А. Субетто // Астраханский вестник экологического образования. – 2019. – №6(54). – С. 4–13. 0,2 / 0,3 п. л.
16. Кулик Н.В. Поступление, трансформация и распределение марганца в Онежском озере / Н.В. Кулик, **Н.А. Белкина**, Н.А. Ефременко // Московский экономический журнал. – 2020. – №1. – С. 13. DOI:10.24411/2413–046X–2020–10063 0,3 / 0,3 п. л.

В изданиях из перечня ВАК по смежным специальностям

17. **Белкина Н.А.** Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) / Н.А. Белкина, О. Сандман, Н.В. Игнатъева // Экологическая химия. – 2006. – №15(3). – С. 174–185. 0,7 / 0,8 п. л.
18. **Белкина Н.А.** К вопросу о путях естественной миграции меди в Онежское озеро / Н.А. Белкина, В.В. Вапиров, Н.А. Ефременко, Т.Н. Романова // Принципы экологии. – 2012. – №1. – С. 23–26. 0,7 / 0,3
19. **Белкина Н.А.** Фосфор в донных отложениях Онежского озера / Н.А. Белкина // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. – 2015. – №173. – С. 97–109. 1 / 1,3 п. л.
20. Калинкина Н.М. Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия / Н.М. Калинкина, А.И. Сидорова, Т.Н. Полякова, **Н.А. Белкина**, Н.А. Березина, И.А. Литвинова // Принципы экологии. – 2016. – Т. 5. – №2(18). – С. 47–68. 0,2 / 0,4 п. л.
21. Калинкина Н.М. Биотестирование донных отложений Онежского озера с учетом их химического состава и показателей состояния глубоководного макрозообентоса / Н.М. Калинкина, **Н.А. Белкина**, А.И. Сидорова, Н.А. Галибина, К.М. Никерова // Принципы экологии. – 2017. – №1. – С. 81–103. 0,2 / 0,4 п. л.
22. **Белкина Н.А.** Особенности миграции, трансформации и накопления железа в Выгозерском водохранилище / Н.А. Белкина, Н.А. Ефременко, Н.В. Кулик // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45. – №5. – С. 505–513. 0,7 / 0,9 п. л.
23. Калинкина Н.М. Динамика состояния бентосных сообществ и химического состава донных отложений Онежского озера в условиях действия антропогенных и природных факторов / Н.М. Калинкина, **Н.А. Белкина** // Принципы экологии. – 2018. – №2. – С. 56–74. 0,4 / 0,7 п. л.
24. Потахин М.С. Изменение донных отложений Выгозера в результате многофакторного антропогенного воздействия / М.С. Потахин, **Н.А. Белкина**, З.И. Слуковский, Д.Г. Новицкий, И.В. Морозова // Общество. Среда. Развитие. – 2018. – №3. – С. 107–117. 0,3 / 0,2 п. л.
25. Страховенко В.Д. Современные донные отложения Онежского озера: структура, минералогический состав и систематизация редкоземельных элементов / В.Д. Страховенко, Д.А. Субетто, Е.А. Овдина, **Н.А. Белкина**, Н.А. Ефременко, А.В. Маслов // Доклады Академии наук. Науки о земле. – 2018. – Том 481. – №4. – С. 414–417. 0,2 / 0,1 п. л.
26. **Белкина Н.А.** Изучение современных донных отложений Заонежского полуострова / Н.А. Белкина, Н.В. Кулик // Общество. Среда. Развитие. – 2019. – №4. – С. 84–90. 1 / 0,5 п. л.

27. **Belkina N.A.**, Assessment of the sediment pollution in the northern part of Lake Ladoga/ N.A. Belkina, E.P. Vasil'eva // *Water Resources*. – 1999. – Vol. 26. – №1. – P. 101–103. 0,5/0,4 п. л.
28. **Belkina N.A.** Retrospective Assessment of Bottom Deposits in Kondopoga Bay, Lake Onega / N.A. Belkina // *Water Resources*. – 2005. – Vol. 32. – №6. – P. 629–639. 1 / 1,6 п. л.
29. **Belkina N.A.** Pollution of bottom sediments in Petrozavodsk Bay of Lake Onega with oil products/ N.A. Belkina // *Water Resources*. – 2006. – Vol. 33. – №2. – P. 163–169. 1 / 1 п. л.
30. **Belkina N.A.** The distribution and transformation of oil hydrocarbons in Onega Lake bottom sediments/ N.A. Belkina, A.V. Ryzhakov, T.M. Timakova // *Water Resources*. – 2008. – V. 35. – №4. – P. 451–459. 0,7/1,0 п. л.
31. Kalinkina N.M. Bioindication of the state of deep-water areas in Petrozavodsk bay, Lake Onega, by macrozoobenthos characteristics / N.M. Kalinkina, **N.A. Belkina**, T.N. Polyakova, M.T. Syarki // *Water Resources*. – 2013. – Vol. 40. – №5. – P. 528–534. 0,2 / 0,2 п. л.
32. Kalinkina N.M. Toxicity bioassay of bottom sediments in large water bodies in Northwestern Russia with the use of crustaceans / N.M. Kalinkina, N.A. Berezina, A.I. Sidorova, **N.A. Belkina**, A.K. Morozov // *Water Resources*. – 2013. – Vol. 40. – №6. – P. 657–666. 0,2 / 0,3 п. л.
33. **Belkina N.A.** Retrospective assessment of bottom sediment condition in the Vygozero Reservoir/ N.A. Belkina // *Water Resources*. – 2014. – Vol. 41. – № 3. – P. 270–279. 1 / 1,6 п. л.
34. Kalinkina N. Decline in the deepwater benthic communities abundance in the Onego Lake under multifactor influence / N. Kalinkina, A. Sidorova, **N. Belkina**, N. Berezina, I. Litvinova // *Principyèkologii*. – 2016. – Vol. 5. – №2. – P. 43–61. 0,2 / 0,4 п. л.
35. Kalinkina N. Bioassay of Lake Onego bottom sediments toxicity based on their chemical composition and deep water macrozoobenthos state / N. Kalinkina, **N. Belkina**, A. Sidorova, N. Galibina, K. Nikerova // *Principyèkologii*. – 2017. – Vol. 6. – №1. – P. 81–103. 0,2 / 0,4 п. л.
36. **Belkina N.A.** Specifics of Iron Migration, Transformation, and accumulation in the Vygozero Reservoir / N.A. Belkina, N.A. Efremenko, N.V. Kulik // *Water Resources*. – 2018. – Vol. 45. – №5. – P. 738–745. 0,7 / 0,9 п. л.
37. Ibragimova A.G. The changes in the composition of Cladocera community in bottom sediments of Lake Maloye Shirozero (Zaonezhsky Peninsula) as a consequence of shifts of environmental and climatic conditions / A.G. Ibragimova, L.A. Frolova, D.A. Subetto, **N.A. Belkina**, M.S. Potakhin // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 107. – # 012029. DOI:10.1088/1755-1315/107/1/012029 0,1 / 0,1 п. л.
38. Kalinkina N. Dynamics of benthic communities state and the sediment chemical composition in Lake Onega under the influence of anthropogenic and natural factors / N. Kalinkina, **N. Belkina** // *Principyèkologii*. – 2018. – Vol. 7. – №2. – P. 56–74. 0,2 / 0,4 п. л.
39. Strakhovenko V. Mineral and geochemical composition of the Onega ice lake sediments / V. Strakhovenko, D. Subetto, T. Hang, E. Ovdina, I. Danilenko, **N. Belkina**, M. Potakhin, M. Zobkov, V. Gurbich // *BALTICA*. – 2018. – Vol. 31. – №2. – P.165–172. 0,1 / 0,1 п. л.
40. Strakhovenko V.D. Modern Bottom Sediments of Lake Onega: Structure, Mineralogical Composition, and Systematization of Rare-Earth Elements / V.D. Strakhovenko, D.A. Subetto, E.A. Ovdina, **N.A. Belkina**, N.A. Efremenko, A.V. Maslov // *Doklady Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 481. – №2. – P. 988–992. 0,1 / 0,1 п. л.
41. Hang T. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia / T. Hang, V. Gurbich, D. Subetto, V. Strakhovenko, M. Potakhin, **N. Belkina**, M. Zobkov // *Quaternary International*. – 2019. – Vol. 524. – P. 13–23. DOI:10.1016/j.quaint.2019.03.021 0,1 / 0,1 п. л.
42. Thomas C. Lateral variations and vertical structure of the microbial methane cycle in the sediment of Lake Onego (Russia) / C. Thomas, V. Frossard, M.–E. Perga, N. Tofield–Pasche, H. Hofmann, N. Dubois, **N. Belkina**, M. Zobkova, S. Robert, E. Lyautey // *Inland Waters*. – 2019. – №9(2). – P. 205–226. DOI: 10.1080/20442041.2018.1500227 0,1 / 0,1 п. л.
43. Strakhovenko V. Distribution of Elements in Iron-Manganese Formations in Bottom Sediments of Lake Onego (NW Russia) and Small Lakes (Shotozero and Surgubskoe) of Adjacent Territories / V. Strakhovenko, D. Subetto, E. Ovdina, **N. Belkina**, N. Efremenko // *Minerals* – 2020. – №10, 440. DOI:10.3390/min10050440 0,1 / 0,1 п. л.
44. Strakhovenko V. Mineralogical and Geochemical studies of Late Holocene bottom sediments of Lake Onega / V. Strakhovenko, D. Subetto, E. Ovdina, I. Danilenko, **N. Belkina**, N. Efremenko, A. Maslov // *Journal of Great Lakes Research*. – 2020. – 46. – P. 443–455. 0,1 / 0,1 п. л.
45. Subetto D. Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) / D. Subetto, A. Rybalko, V. Strakhovenko, N. Belkina, M. Tokarev, M. Potakhin, M. Aleshin, P. Belyaev, M. Dubois, V. Kuznetsov, D. Korost, A. Loktev, N. Shalaeva, A. Kiskina, N. Kostromina, Yu. Kublitskiy, A. Orlov // *Minerals*. – 2020. – V.10 (11). – 964. – 20 p. – DOI:10.3390/min10110964. 0,1 / 0,1 п. л.
46. Zobkov M. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake / M. Zobkov, N. Belkina, V. Kovalevski, M. Zobkova, T. Efremova, N. Galakhina // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 8. – №. 5. – P. 104367. 0,3 / 0,2 п. л.

Разделы в монографиях

47. Белкина Н.А. Химический состав донных отложений Ладожского озера [Текст] / Н.А. Белкина, Е.П. Васильева // Современное состояние водных объектов Карелии / отв. Ред. Н.Н. Филатов, Т.П. Куликова, П. А. Лозовик. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. – Гл.5. – С.85–86. 1 / 0,2 п. л.
48. Белкина Н.А. Химический состав донных отложений озер Кончезерской группы [Текст] // Н.А. Белкина // Современное состояние водных объектов Карелии / отв. Ред. Н.Н. Филатов, Т.П. Куликова, П.А. Лозовик. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. – Гл.10. – С.162–163. 1 / 0,2 п. л.
49. Васильева Е. П. Особенности формирования донных отложений [Текст] / Е. П. Васильева, Н. Н. Давыдова, Н. А. Белкина // Онежское озеро, экологические проблемы / Ред. Н. Н. Филатов. – Петрозаводск: КарНЦ РАН Петрозаводск, 1999. С. 109–145. 0,2 / 0,4 п. л.
50. Белкина Н.А. Поровые воды донных отложений северного района Ладожского [Текст] / Н. А. Белкина, О. Сандман, М. В. Калмыков, Н. В. Игнатьева // Ладожское озеро / Ред. Н. Н. Филатов. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. – С. 128–131. 0,7 / 0,2 п. л.
51. Белкина Н. А. Современные донные отложения северного района Ладожского озера [Текст] / Н. А. Белкина // Ладожское озеро / Ред. Н. Н. Филатов. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. – С.123–127. 1/0,6 п.л.
52. Белкина Н.А. Донные отложения Заонежского полуострова [Текст] / Н.А. Белкина // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма / Ред. Е.П. Иешко. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. – С.65–71. 1 / 0,7 п. л.
53. Белкина Н.А. Химический состав донных отложений Ладожского озера [Текст] / Н.А. Белкина // Состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / Ред. П. А. Лозовик. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. – С.85–89. 1 / 0,5 п. л.
54. Белкина Н.А. Химический состав донных отложений Онежского озера [Текст] / Н.А. Белкина // Состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / Ред. П.А.Лозовик. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. – С.40–48. 1/ 0,9 п. л.
55. Белкина Н.А. Донные отложения Онежского озера [Текст] / Н.А. Белкина // Атлас Онежское озеро / Ред. Н.Н. Филатов. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. – С.100–104. 1 / 0,5 п. л.
56. Белкина Н.А. Донные отложения [Текст] / Н.А. Белкина // Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. – С. 37–39. 1 / 7 п. л.
57. Белкина Н.А. Внутренняя фосфорная нагрузка в Онежском озере [Текст] / Н.А. Белкина // Крупнейшие озера–водохранилища Северо–Запада Европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. Ред. Н.Н. Филатов [и др.]. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. – С. 95–103. 1 / 1,0 п. л.
58. Белкина Н.А. Донные отложения Выгозерского водохранилища [Текст] / Н.А. Белкина // Крупнейшие озера–водохранилища Северо–Запада Европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. Ред. Н.Н. Филатов [и др.]. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. – С. 247–256. 1 / 1,2 п. л.
59. Белкина Н.А. Особенности седиментогенеза меди в Онежском озере [Текст] / Н.А. Белкина // Крупнейшие озера–водохранилища Северо–Запада Европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. Ред. Н.Н. Филатов [и др.]. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. – С. 103–107. 1 / 0,6 п. л.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор благодарит научного консультанта д.г.н., декана факультета географии РГПУ им. А.И. Герцена Субетто Д.А., научный коллектив ИВПС КарНЦ РАН, Е. П. Васильеву, к.г.-м.н. Г. С. Бородулину, д.х.н. П. А. Лозовика, а также д.г.-м.н. ИГМ СО РАН Страховенко В. Д., д.г.-м.н. ВНИИ «Океангеология» Рыбалко А. Е., к.г.н. ИОЗ РАН Игнатьеву Н. В. за оказанную поддержку и ценные советы при подготовке диссертационной работы. Особую благодарность автор выражает сотрудниками лабораторий палеолимнологии, гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН Ефременко Н.А., Селивановой Е. А., Басовой С. В., Родькиной И. С., к.б.н. Рябинкину А. В., к.г.н. Потахину М. С., к.б.н. Кухареву В. И., Калмыкову М. В., Кравченко И. Ю., Перской Е. А., Кулик Н. В. и экипажу НИС «Эколог» за помощь в проведении исследований.